

THE DOWNBURST

ダウンバースト(下降噴流)

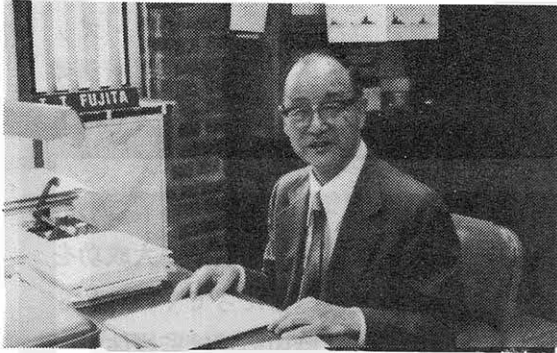
マイクロバースト(小型噴流)とマクロバースト(大型噴流)
NIMRODおよびJAWS研究計画の報告

シカゴ大学教授
T. セオドル 藤田 著

上 田 恒 夫 訳

社団法人 日本航空機操縦士協会 発行

序 文



強烈な嵐（ストーム）のエネルギーは親雲のごく限られた部分に集中しているというこの事実が、この10年間ストームの規模と親雲の規模の違いを明確に識別させるようになった。著者が考案した、気象現象の規模を識別するための尺度によれば、トーネード（たつまき）やマイクロバースト（小型噴流）等々は、マイルスケール（40mから4 km）の現象であり、他方それらの現象をもたらす親雲は、メソスケール（4 km から400km）のじょう乱なのである。マイルスケールのダウンバースト（下降噴流）は、著者がこれをマイクロバーストと命名し、離着陸中のジェット機に発生する事故またはインシデント（事故寸前のできごと）の重大な原因となるウインドシア（風の急変）として警告するまで、その存在がハッキリとは把握されてはいなかったのである。

ストーム発生後の被害調査中に撮影した写真の中で、1974年4月3日—この日はたつまきの大発生があった日であるが—の後、ウェストバージニア州ベックリーで撮影したそれは、著者にイースタン航空66便の事故を調査してみようとする勇気を起こさせたのである。著者の事故調査は、現在はFSF（飛行安全財団）に所属するホーマー・マウデン機長の要請によって始まったのであるが、調査の結果はニューヨーク市のジョンF・ケネディ国際空港にマイクロバースト・ウインドシアが存在したという事実を突きとめたのである。

この後、著者とシカゴ大学のラメシュ・スリバスタバ教授が主任研究者となって実施したNIMROD計画（Northern Illinois Meteorological Research On Downburst 北部イリノイ州における下降噴流に関する気象学的研究）は、クリップ・ミュリノ博士（現UCAR—大気研究共同大学連合総長）、バブ・セラフィン博士（現国立大気研究センター部長）、ラン・テイラー博士の諸氏によって検討され、練り直された。NCARが国立科学財団（NSF）の資金援助を得て、NIMROD計画における観測器材の使用と野外観測を承認したとき、マイクロバーストの存在をドップラー・レーダーを使用して本格的に確かめてみたいという著者の夢は叶ったのである。1978年に実施したこの計画は、大成功であった。観測終了後の手間のかかる仕事である解析は、ロジャー脇本博士（現UCLA—カリフォルニア大学ロサンゼルス校教授）とグレッグ・フォーブス博士（現ペンシルバニア州立大学教授）によって行われ、ドップラー・レーダーは、特定の目的をもって運用すれば、大きな障害物やグラウンド・クラッター（地形によるレーダー画面の乱れ）がない限り、マイクロバーストを検地することができるという事実を確認したのである。

航空への応用を目的としたマイクロバーストによるウインドシアの研究は、次に行われたJAWS計画（Joint Airport Weather Studies—合同空港気象研究）によって、飛躍的な進歩を遂げた。この計画は、著者とジョン・マッカシー博士（NCAR）、ジム・ウイルソン氏（NCAR）の三者によって行われた。だが1982年に実現したJAWSは、ウイルモット・ヘス博士（現NCAR所長）、ボブ・セラフィン博士、リット・カーボーン氏（NCAR野外観測施設マネージャー）の献身的な指導と助力がなかったならば、決して成功はしなかったであろう。また、シカゴ大学から著者と共に観測に

参加したロジャー・脳本博士（当時は博士研究員）、ブライアン・スミス、ブライアン・ワラノスカス両大学院生は、NCARからJAWSに参加して、技術および庶務的な援助をしてくれた、キャッシー・キッセンジャー、シンディー・ムーラー、フィリス・オーラーキー、リタ・ロバーツ、シェリー・ズッカーの各女史に対して感謝したい。JAWSの観測中、著者はアル・ロディー教授、ウエイン・サンズ操縦士、そしてワイオミング大学のビル・メーニー教授達と、キングエアー機でマイクロバーストの下降気流域を横断し、強烈なストームの得難い写真を撮影するという、忘れられない経験をした。

この本に納めたデータの収集には、NCARが重要な役割を果たしてくれた。また、観測が大成功を納めたその裏には、PAM（移動式自動メソ気象観測塔）やレーダーの維持運用にあたってくれた28人の科学者と技術者の、いつ出没するかわからないマイクロバーストへの、四六時中の連続監視体制があった。実際、NIMRODのある日、全員が目を赤くして、3台のドップラー・レーダーを連続24時間45分間にわたって運用してくれた。このような各関係者の献身的な努力がなければ、データの収集は、かくも顕著な成功を納めることはできなかった。観測期間中、ドップラー・レーダーの画像の多くは35ミリのスライドに納められ、特異な現象については深夜や休日に再現して、撮影が行われた。NCARの研究データ支援システム（RDSS）は、マイソスケールの微少な気象現象を、レーダーのRHI（垂直面探知）およびPPI（水平面探知）の両モードで捕え、撮影するための有力な装置であった。

気象衛星およびメソ気象学研究プロジェクト（SMRP-1961年より現在に至るまで活動中）のメンバー達は、本書の刊行に当って中心的な役割を果たしてくれた。その中で著者は、前任気象学者ジェイム・テクサン氏には計画管理、原稿作成、タイプ等々の労に対して、NOAA（国立海洋・気象庁）のストーム・データ誌の編集委員デュエン・スティーグラード氏には、アメリカ全土からのマイクロバーストのデータと写真収集に対して、ジム・パターズ氏には、この本に使用されているカラー地図や図表の作成に対して、そして大学院生達には、第6章に掲げたストーム解析における精力的かつ献身的な助力に対して感謝したい。

著者は更に、この本の現行作成に当り助力してくれた多くの方々にも、感謝の意を表したい。フェルナンド・カラシナ博士（NOAA/ERL-国立海洋・気象局/環境研究所）には、航空機事故/インシデント調査における共同研究に対して格別の謝辞を贈りたい。グレッグ・サロトロ氏（NTSB-国家運輸安全委員会）は、航空機事故/インシデントのデータを提供してくれた。ジョー・ゴールド博士（NWS-国立気象サービス本部）は、マイクロバーストの写真と助言を与えてくれた。国立科学財団（NSF）のラン・テイラー博士とジョージオ・テシー博士、ジム・ダッジ博士（NASA-航空宇宙局）、リン・ウィットニー二世（NESDIS-国立環境衛星データおよび情報サービス）、バブ・コナシビッツ氏（NRC-国立核規制委員会）、バブ・アビリー氏（元NRC）、そしてホーマー・マウデン機長、アーニー・レイナー機長（パンアメリカン航空）、上田恒夫機長（日本航空）の諸氏は、ふたつの観測からのみならず全米および全世界からマイクロバーストに関するデータを入手する上で、協力し、提言し、指示してくれた。テネシー州メンフィスに現在設置されている観測網から最新のデータを提供してくれたのは、マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所のジム・エバンス博士とマリリン・ウルフソン女史、FAA（連邦航空局）のドナルド・ジョンソン氏とダン・ターンブル氏である。さしえと図案の一部は、菅野昭子女史の御助力による。最後に私の妻、藤田すみ子には数えき

れない程長い年月にわたる忍耐と、原稿をタイプする上での隠された努力に対し、特別の感謝を捧げたい。

本書刊行に至る研究は、国立科学財団（NSF）、航空宇宙局（NASA）、国立環境衛星データおよび情報サービス（NESDIS）、連邦航空局（FAA）および国立核規制委員会（NRC）がスポンサーとなって実施された。本書を総カラーで出版する資金は、国立科学財団の承認番号NSF ATM-7921260による。

1985年2月7日

藤田セオドル哲也
シカゴ大学教授

著者略歴

1920年10月23日	-----	北九州市にて誕生
1953年	-----	東京大学理学博士号
1953-1955年	-----	シカゴ大学研究員
1955-1956年	-----	査証更新のため一時帰国
1956-1962年	-----	シカゴ大学メソ気象学研究計画主任
1962年	-----	シカゴ大学准教授（気象学） 気象衛星およびメソ気象学研究プロジェクト （SMRP）主任
1965-現在	-----	シカゴ大学教授
1968年	-----	米国市民権取得

受賞歴

1959年岡田賞（日本気象学会）、1960年嘉村賞（九州工大）、1967年マイシンガー賞（米気象学会）、1977年ルイス・デ・フロレス提督航空安全賞（飛行安全財団）、1977年航空安全功労賞（飛行安全財団）、1978年第1回功労賞（米国立気象協会）、1979年功労メダル（NASA）、1982年ロージー大気科学功労賞（米航空宇宙学会）、1985年気象衛星25周年記念功労賞（米商務省）

資料－1 米国で使用される時間

PST (Pacific Standard Time) — 太平洋岸標準時間

PDT (Pacific Daylight Saving Time) — 太平洋岸夏時間

MST (Mountain Standard Time) — 山岳部標準時間

MDT (Mountain Daylight Saving Time) — 山岳部夏時間

CST (Central Standard Time) — 中部標準時間

CDT (Central Daylight Saving Time) — 中部夏時間

EST (Eastern Standard Time) — 東部標準時間

EDT (Eastern Daylight Saving Time) — 東部夏時間

夏時間は4月最後の日曜日の午前2時から10月最後の日曜日午前2時まで日照時間の有効利用を目的として使用される。



資料2 本書で使用されている 単位とレーダー観測

1海里=1,852メートル

1マイル=1,609メートル

1フィート=0.305メートル

1ノット=1海里/時=1,852メートル/時

1マイル/時 (mph) = 0.45 m/sec = 0.87 knot

1ノット (knot) = 0.51 m/sec = 1.15 mph

CP-2, 3, 4, ドップラー・レーダー

NCAR (国立大気研究センター) が開発した大気観測用レーダーで、CPは Cloud Physics の略。波長は2号機は10cm (Sバンド)、3号機と4号機は5cm (Cバンド) となっている。

CHILL ドップラー・レーダー

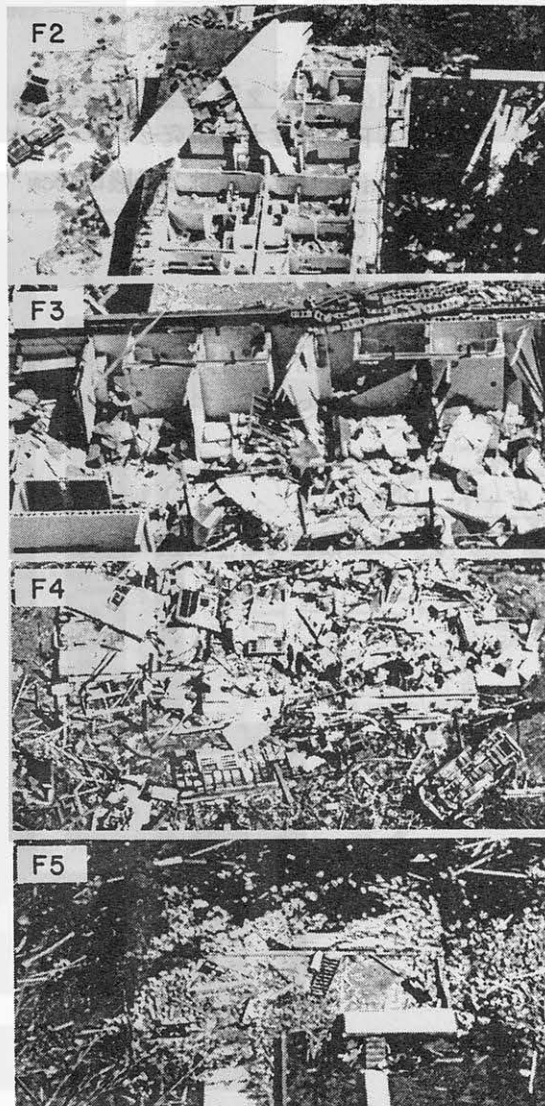
シカゴ大学およびイリノイ州水質調査所が共同で開発したドップラー・レーダーで、波長は10cm (Sバンド) である。

ゲート (P84)

レーダー観測時、不連続的に測定する150ないし300メートルの長さを持った区域。

資料－3 藤田のたつまきスケール (F スケール)

- (F 0) : 時速 40-72 マイル(18-30メートル/秒)。軽度の災害。煙突に軽度の被害を与え、小枝を吹き飛ばし、根の浅い樹木を倒し、看板を損傷させる。
- (F 1) : 時速 73-112 マイル(33-50メートル/秒)。中程度の災害。下限度の 73 マイルはハリケーンの風速の始まりで、屋根の表面をはがし移動式住宅を基礎から外したり転倒させ、走行中の自動車を道路から逸脱させる。
- (F 2) : 時速 113-157 マイル(51-70メートル/秒)。相当の災害。屋根をはがし、移動式住宅を破壊し、ボックス・カーを押し倒し、大木を折ったり引き抜き、軽量の物体をミサイルのように宙に舞わせる。
- (F 3) : 時速 158-206 マイル(71-92メートル/秒)。激しい災害。強靱に建築された家屋の屋根や壁を吹き飛ばし、列車を転覆させ、森林の樹木を引き抜き、重量のある自動車を地面から浮き上がらせて吹き飛ばす。
- (F 4) : 時速 207-260 マイル(93-116メートル/秒)。激じん災害。丈夫な建物を壊滅し、基礎の弱い建築物をかなりの距離まで吹き飛ばし、自動車のような物体をミサイルのように宙に舞わせる。
- (F 5) : 時速 261-318 マイル(117-142メートル/秒)。信じ難い災害。頑丈な枠組みの家屋を基礎から外し、かなりの距離にわたって運び分解する。乗用車の大きさの物体が 100 メートル以上飛行する。信じ難い被害が発生する。
- (F 6－F 12) : 秒速 143 メートルからマッハ 1 (音速)に至る風は、たつまきによっては発生しないと考えられている。



目次

本文ページ

第1章 マイクロバースト発見までの歴史的経緯	1
------------------------	---

第2章 マクロバーストおよびマイクロバーストの観測	8
---------------------------	---

2. 1 惑星と気象現象識別のための比較規模	8
2. 2 マクロバーストの形状	9
2. 3 マイクロバーストの形状	11

第3章 マイクロバーストに起因した航空機事故	19
------------------------	----

3. 1 ウインドシアアが揚力に及ぼす影響	20
3. 2 マイクロバーストに起因した事故例	21
3. 3 離陸中の事故	23

低高度における強度なウインドシアア	24
英国航空252/773便 (ケイノー、ナイジェリア)	25
コンチネンタル航空426便 (デンバー)	26
パンアメリカン航空759便 (ニューオーリンズ)	28
コンチネンタル航空63便 (ツーソン)	32

3. 4 最終進入経路における事故	33
-------------------	----

パンアメリカン航空806便 (パゴパゴ)	34
イースタン航空902便と66便 (ニューヨーク)	35
ヨルダン王立航空600便 (ドーハー、カタール)	41
アリゲニ航空121便 (フィラデルフィア)	43

4. 1	イリノイ州シカゴ周辺でのNIMROD観測網	45
4. 2	コロラド州デンバー周辺でのJAWS観測網	49
4. 3	コンピューターによるマイクロバーストの識別	53
4. 4	マイクロバーストの気象要素	60
	瞬間最大風速の風向	61
	マイクロバーストの最大風速	63
	半速風の持続時間	64
	温度と露点温度	65
	マイクロバースト内部の地上気圧	66
4. 5	日変化と地域別変化	68

第5章 親雲とマイクロバーストのタイプ

70

5. 1	マイクロバーストの分類	70
	ウェットおよびドライ・マイクロバースト	70
	停滞性および移動性マイクロバースト	71
	放射線型および曲線型マイクロバースト	72
	空中および地表のマイクロバースト	72
	吹き出し型および回転円筒型マイクロバースト	73
	小型のマイソサイクロンを伴ったマイクロバースト	74
5. 2	親雲の分類	75
	かなとこ雲と巨大雷雲	75
	弓型雷雲	76
	独立性しゅう雨	76
	積雲	77

6. 1	ヨークビル・マイクロバースト (1978.5.29)	79
6. 2	オヘア・マイクロバースト (1978.6.7)	81
6. 3	弓型雷雲マイクロバースト (1978.6.25)	83
6. 4	フラット・タイヤ・マイクロバースト (1982.5.19)	85
6. 5	回転円筒型マイクロバースト (1982.6.30)	87
6. 6	ノースプラッテ・バレー・マイクロバースト群 (1982.7.8)	88
6. 7	弓型雷雲マイクロバースト (1982.7.14)	90
6. 8	デンバー地区マイクロバースト群 (1982.7.14)	93

砂じん発散マイクロバースト	94
環状砂じんマイクロバースト	95
リット・カーボン マイクロバースト	97

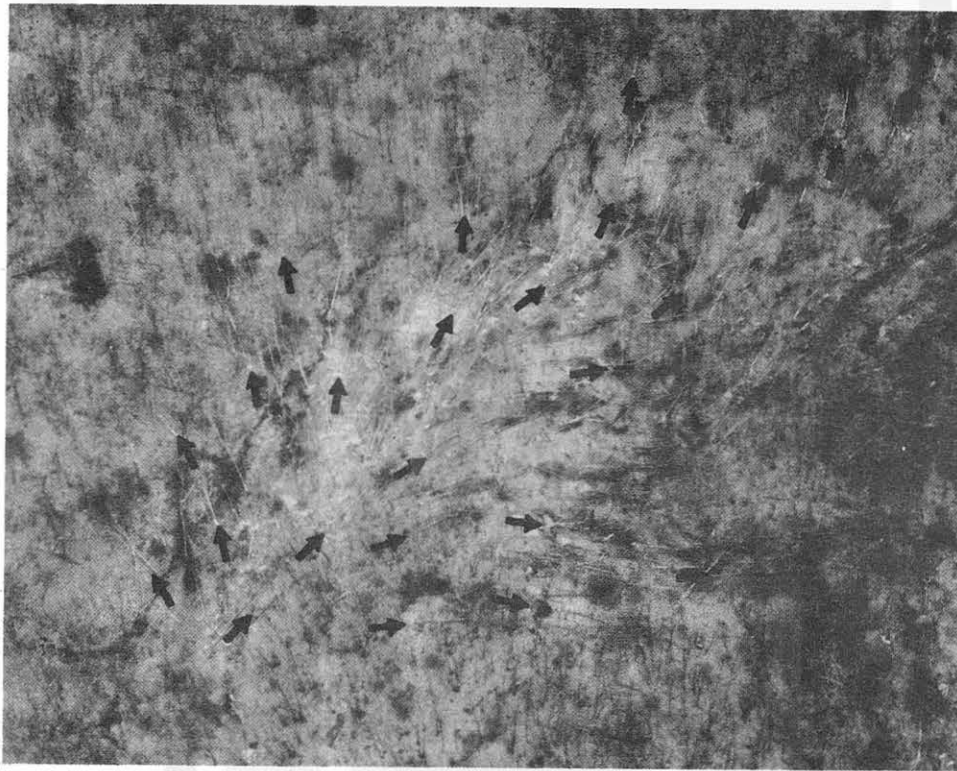
6. 9	大アクリイ型マイクロバースト (1982.7.16)	100
6. 10	アンドリュース空軍基地マイクロバースト (1983.8.1)	107
6. 11	ハシツビル観光汽船マイクロバースト (1984.7.7)	109
6. 12	メンフィス空港マイクロバースト (1984.10.20)	116

総括および結語	119
参考文献 (本文参照)	120
索引 (本文参照)	121

第1章

マイクロバースト発見までの歴史的経緯

それは丁度10年前のことであった。1974年4月3日から4日にかけて、148個のたつまきの大発生があり、それらが残っていた被害調査をしている最中に、著者は森林に樹木の異常な倒壊のパターンを発見したのである。(図1.1) たつまきの通過後に、通常空中から観測される渦巻き状の樹木の倒壊のパターンとは異なり、このとき数百本の木々は放射状に押し倒されていたのである。スターバースト(放射状に吹き出した風)の中心付近では、木々は平らに押し倒されたり、引き抜かれていて、茶褐色の土をかぶっていた。



<図1.1> ウェストバージニア州ベックリー付近における、スターバースト状(放射状)の樹木の倒壊。この写真は、1974年4月3日から4日にかけて大発生した、たつまきの進行経路を調査中、著者が撮影したものである。これは、強力なダウンバーストは、たつまきと同ような被害をもたらす場合もあることを示している。

現場上空を飛行した際、放射状の被害をもたらした突風はすでに存在しなかったが、スターバーストの中心付近で地面に激突した下降気流があったことが、著者の脳裏に自然に浮かんできたのである。スターバーストは、水道のホースの先端を下に向け、激しい水の流れを地面にぶっつけて放射状の流れをつくることによって、簡単に模擬することができる。ホースの先端の角度を変えることによって、完全な形をしたスターバーストは、扇型の吹き出しに変化する。

前述のたつまきの大発生は、合計 4,180 キロメートルの長さにわたる地域に被害を及ぼし、315 人を死亡させ、5,484 人を負傷させた。しかし、その経路上のすべての被害が、たつまきによるものではなかった。経路の内外には、かなりの数の放射状の損壊が発見されたのであるが、これらがたつまきの被害と同一視されてしまったのは、その地域の住民がたつまきの被害しか知らなかったためである。スターバーストによる強い風は、やはり屋根を吹き飛ばしたり、簡単に木々をねじ曲げたり、引き抜いたりするので、被害の15パーセントは、たつまきではなく、スターバーストによるものであった。

他方、1975年6月24日、ニューヨークのジョン・F. ケネディ空港で発生した、イースタン航空66便の墜落事故を調査中、著者はスターバーストという気流を前提として、この航空機は、1年前に発見し、撮影したスターバーストほど強くはないにしても、同様の風の中を飛行しようとしたのではないか、という仮説を立てたのである。FDR (Flight Data Recorder - 飛行データ記録装置) と目撃者の証言をつぶさに解析した結果、著者はこの種の風を「ダウンバースト」と人付けた。だが、この風はジェット機を墜落させるほど強烈なものでありながら、地上に設置された風力計で探知して、進入中の航空機に事前に警報を発するには、あまりにも小規模なものであった。

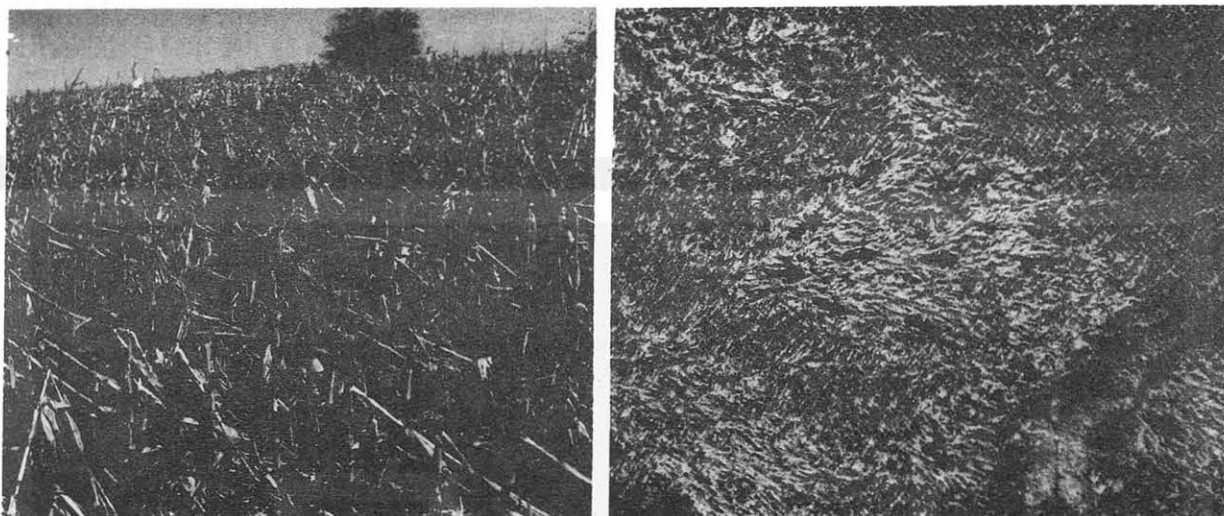
しかし、残念なことには著者が提示したダウンバーストという概念、すなわち地表面あるいはその付近で爆発的に発散し、破壊的な被害を及ぼす風を発生させる強い下降気流の存在は、疑義があるとされてしまった。当時の多くの気象学者達は、雲中であれ雲底であれ、そこに存在する下降気流はいかに強いものであっても、地表面に達するかなり以前にほとんどその存在がわからなくなるほど弱まってしまう、と信じていた。それはとりもなおさず、地上あるいはその付近を飛行する航空機は、下降気流が誘発する風の吹き出しの影響を受けないということになる。

1970年代の後半、論争にケリをつけるため、著者とシカゴ大学の共同研究者達はセスナ機による低空飛行を繰り返し、米中西部一帯に発生した大型、小型のストームが残していった破壊の痕跡を望遠写真に納めた。この新事実発見のための飛行中に撮影した数多くの写真は、上空

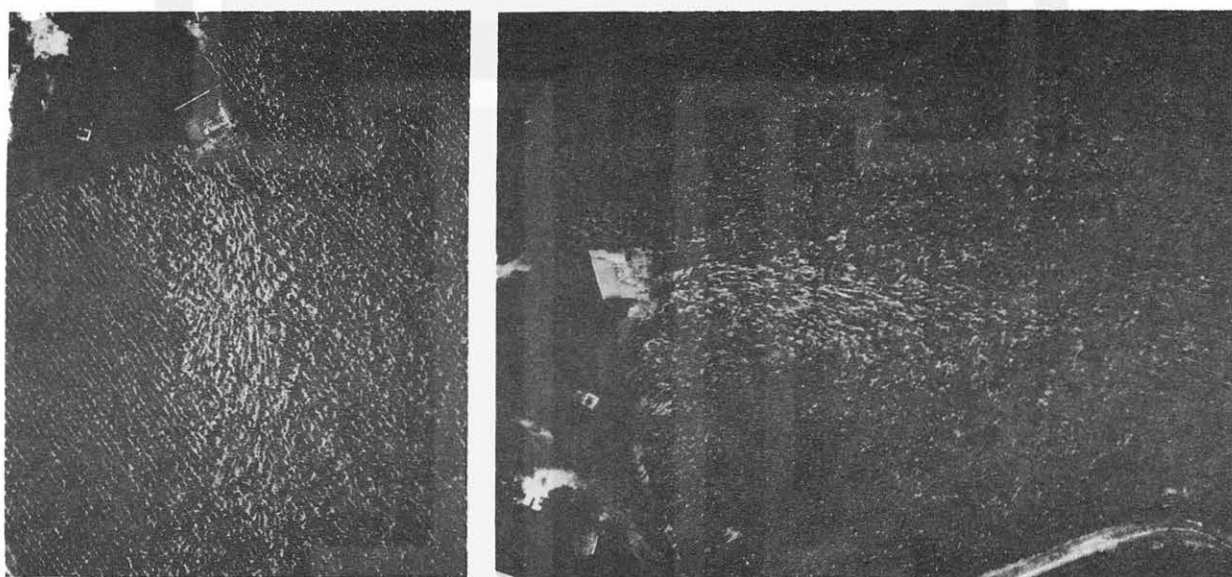
からほとんど発散することなく束になって地表付近まで降下し、発散する下降気流の存在を圧倒的に証明することとなった。

空中および地上で撮影したダウンバーストの中心部の写真は、気流が地表面あるいはその上にある物体を直撃すると、その向きは垂直から水平に変わること示している。例えば、ダウンバーストの真ん中であつたトウモロコシの茎は、畑の一点から周囲に吹き出す直線状の風によって折られたり、切られていた。(図1.2)



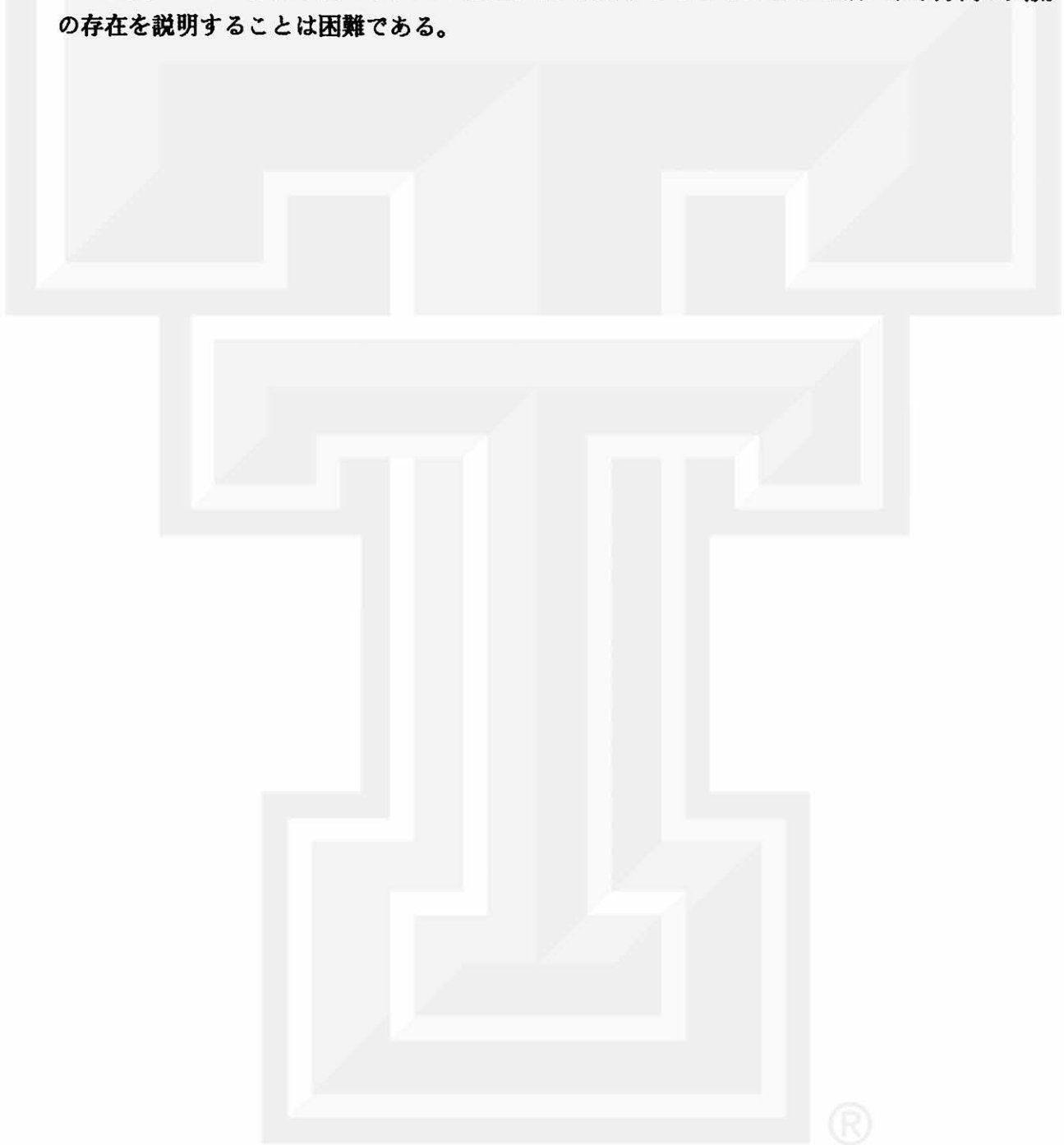


＜図1.2＞ インディアナ州に降下したマイクロバーストの中心部を、空中および地上から撮影した写真。1977年9月30日、藤田撮影。



＜図1.3＞ 傾斜したトタン屋根によって誘発された、水平方向へのジェット状の気流。同じく1977年9月30日、インディアナ州の農場で撮影。屋根の一部は、はがされ、とうもろこし畑の中に運ばれている。藤田撮影。

もう1つの例は、下降気流が傾斜したトタン屋根によって進行方向を変えられ、水平方向への強い気流となって、トウモロコシ畑に吹き出したことを示している。通常、地上にある建物は、水平方向の風に対しては障害となるから、その建物から風下側へは弱い風の域がバンド状に形成される。従って、図1. 3に見るように、下降気流の存在を予想し、これが傾斜したトタン屋根によって方向が変えられたと仮定しない限り、ジェットのような強い水平方向の気流の存在を説明することは困難である。



ダウンバーストの最初の観測計画 NIMROD (Northern Illinois Meteorological Research On Downburst - 北部イリノイ州における下降噴流に関する気象学的研究) は1978年、藤田とスリバスタバが主任研究者となって、シカゴ大学によって行われた。イリノイ州シカゴの西部郊外に設置された観測網は、ダウンバーストの全般的な構造の把握を主眼として、3台のドップラー・レーダーと27基の PAM (Portable Automatic Mesonet - 移動式自動気象観測塔) によって構成された。

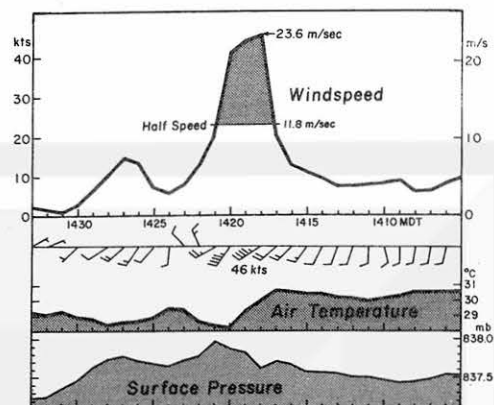
NIMROD の観測網での42日間にわたる観測の中で、ドップラー・レーダーと PAM は、かなりの数のダウンバーストを捕捉した。水平的規模では、あるものは小型で、またあるものはかなり大型であった。比較的小型のダウンバーストを大型のそれと区別するため、著者はダウンバーストを規模に基づいて、マクロバーストとマイクロバーストに分類した。

第2回目の実験観測 JAWS (Joint Airport Weather Studies - 合同空港気象研究) は1982年、藤田、マッカーシー、ウイルソンが主任研究者となって、シカゴ大学と NCAR (National Center for Atmospheric Research - 国立大気研究センタ) によって行われた。コロラド州デンバーの郊外に設けられた JAWS の観測網は、マクロバーストよりもマイクロバーストを捕捉することを目的としてデザインされた。なぜならば、マイクロバーストに起因する航空機事故やインシデント (事故寸前のできごと) が、世界の各地で発生し続けていたからである。事実、パンアメリカン航空759便の事故は、JAWSの観測中にニューオーリンズ空港で、マイクロバーストに巻き込まれて発生したのである。

<表 1.1> NIMROD (1978年) と JAWS (1982年) 観測網の比較と
24 時間運用の PAM によって検知されたマイクロバーストの統計。

プロジェクト人	NIMROD	JAWS
観測期間	5月19日 - 7月1日 (42日間)	5月15日 - 8月9日 (86日間)
ドップラー三角	56x57x60 km	15x18x28 km
ドップラー・レーダー	CHILL CP-3 CP-4	CP-2 CP-3 CP-4
PAM観測塔の数	27	27
マイクロバーストの総数	50	186
ドライ・マイクロバースト数	18 (36%)	155 (83%)
ウェット・マイクロバースト数	32 (64%)	31 (17%)

表1.1に示した NIMROD と JAWS プロジェクトの比較において、NIMROD の観測網が JAWS のそれよりもかなり大きくなっている〔本文ページ47,50参照〕。それは、前者がマクロバーストとマイクロバーストの両方を検知するようにデザインされたのに対し、後者はマイクロバーストのみの検知を目的としたからである。NIMROD の観測網の中で発見されたマイクロバーストのうち、64パーセントは0.01インチ (0.25ミリメートル) 以上の雨を伴っており、残りの36パーセントには地上で計測できるほどの雨は無かった。このデータに基づき、マイクロバーストは活動中に地上にもたらず雨の量によって、ドライ・マイクロバーストとウェット・マイクロバーストに分類されることになった。



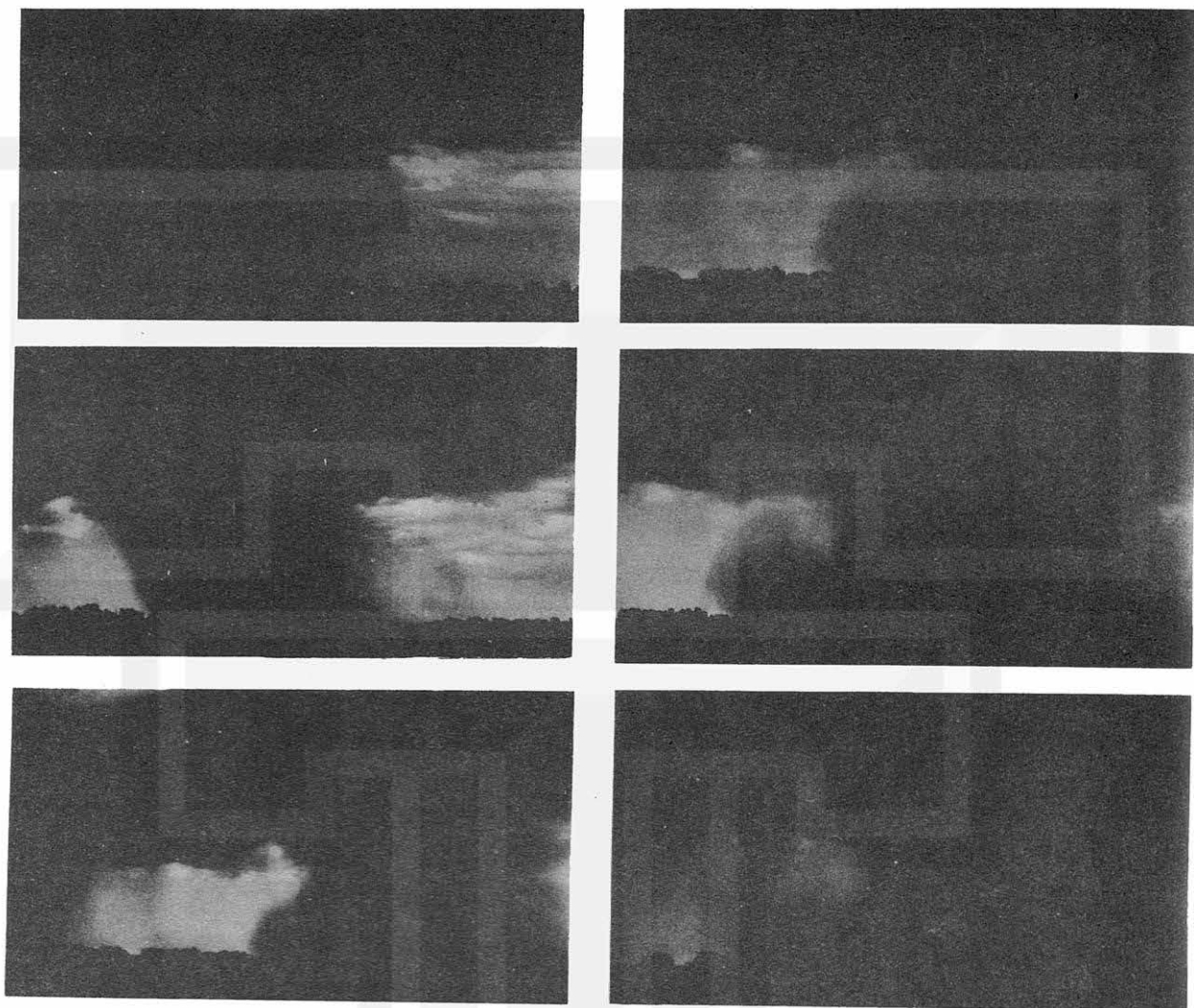
＜図1.4＞ 1982年7月14日、コロラド州デンバー、ステープルトン空港の滑走路35Rの上空に現れた、一見無害そうなバーガ（左）。このバーガが、マイクロバーストを発生させたわずか3分間、最大風速を吹かせた。温度は2.5度C低下し、地上気圧は0.3-0.4ミリバール上昇した（右）。藤田撮影。

JAWS で観測されたマイクロバーストのうち、83パーセントがドライ・マイクロバーストであったということは、注目に値する。JAWS の期間中ステープルトン空港上空で撮影した写真によれば、ドライ・マイクロバーストは害を及ぼしそうなバーガ（空中で蒸発してしまう雲底からの雨）としてしか目に映らないのである。だが、バーガの直下、滑走路35R（図の左上）の近くに設置された PAM 21 は、最大風速23.6メートル/秒（46ノット）を記録したのである（図1.4）。他方、NIMROD で観測されたマイクロバーストの64パーセントがウェット・マイクロバーストであり、その中には視界をさえぎるような豪雨を伴ったものもあった。NIMROD では、ウェット・マイクロバーストの写真は入手できなかったが、カンサス州ウィッチタの東部で連続撮影した写真は、ドライ・マイクロバーストとウェット・マイクロバーストの顕著な違いを見せている（図1.5）。

米国で発生するマイクロバーストによる有害な風は、主として春、夏の時期に集中している。そして、これまで多くのマイクロバーストは、発生の翌日か、数日後に空中または地上調査によって確認されてきた。このような目視による観測では、とうもろこし畑は、精度は良くないが、密に設置された風力計のような役目をするので、被害をもたらした風の流線が保存された最適な観測場である。地上 500 から 1,000 フィート上空で撮影した拡大写真は、農夫が刈り取るまで押しつぶされたままになっているとうもろこしの茎のパターンを示している。（図1.6）

枯草の束や固定されていない物体はまた、マイクロバーストによる有害な風の格好の痕跡を残す。オクラホマで空中から撮影した写真は、直線的に吹き出すマイクロバーストの風のパターンを典型的に示している。(図1.7)

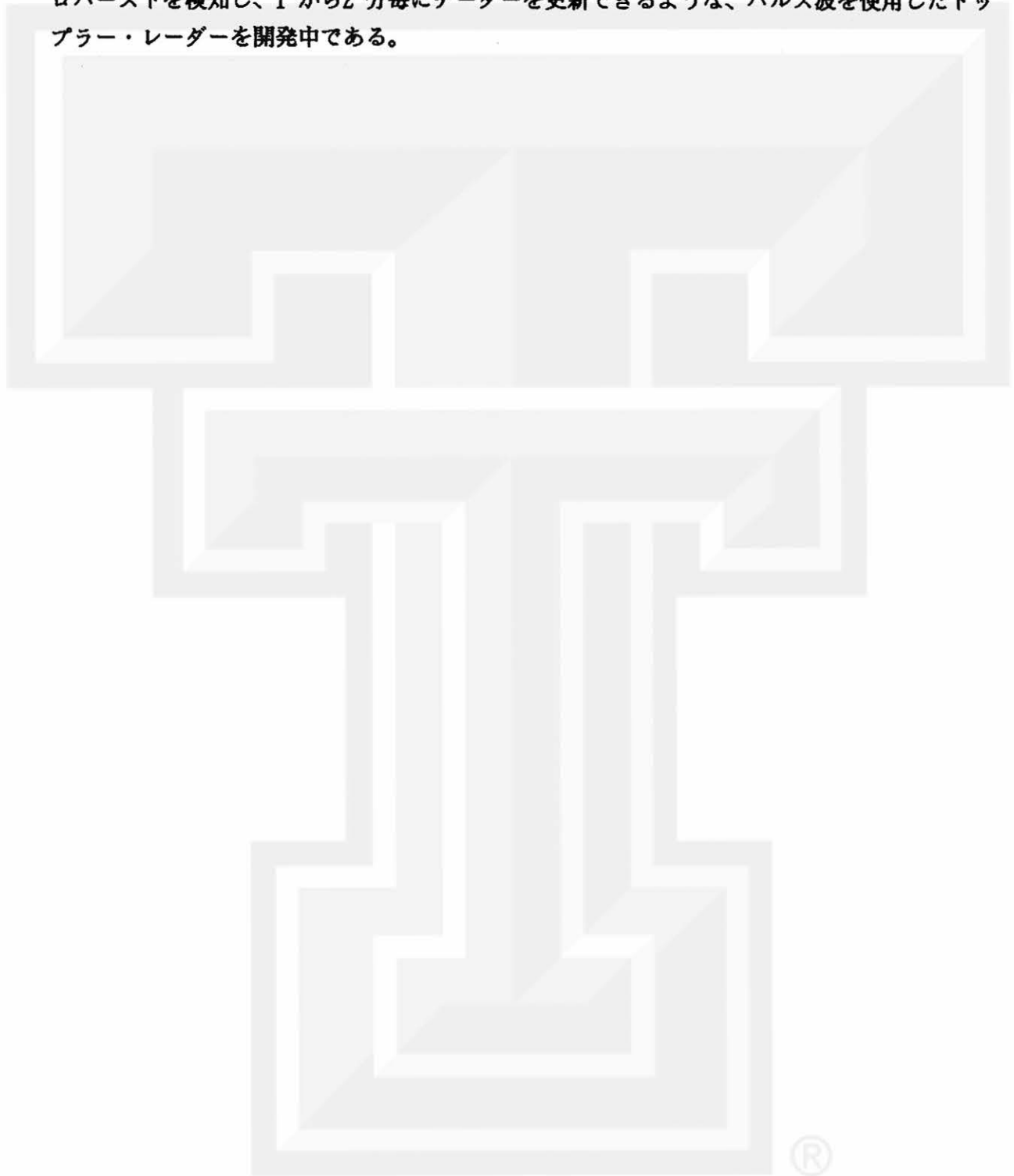
ストームによる被害調査をしていると、時々その地域の住民から、警報がなかったにもかかわらずたつまきの被害に遭った、という苦情を受けることがあった。だが、空中から調査してみると、それらの多くはたつまきではなく、たつまきと同じような被害をもたらすマイクロバーストであった。



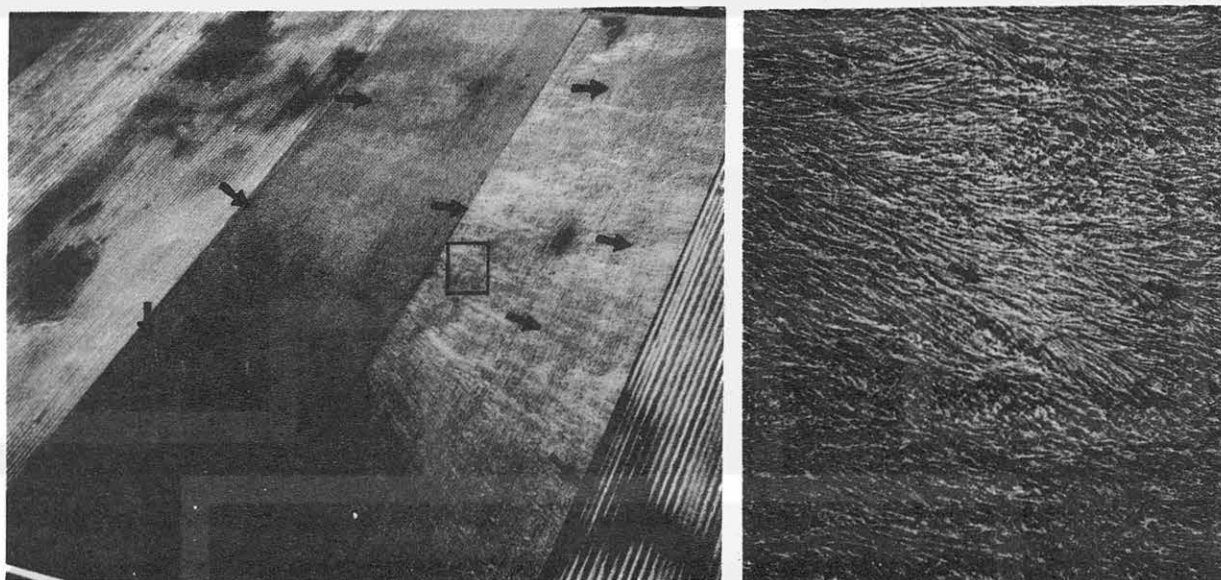
<図1.5> 1978年7月1日、カンサス州ウィッチタで撮影したウエット・マイクロバーストの連続写真。南に向き、10から60秒間隔で撮影。水平面を軸とする渦が巻き上がっているのが、吹き出しの左端（西側）近くに見られる。マイク・スミス氏の版權所有写真。

NIMROD および JAWS の観測時を除いて、米国の各地に設置されているドップラー・レーダーは、これまでほとんどマイクロバーストによる風を検知したことは無かった。これは、マイクロバーストが極めて小型で、短寿命であるためである。更には、その最大風速が非常に地表面に近いため、マイクロバーストの反射波が地形からの反射波と混ざりあって、極度に劣化してしまうためでもある。

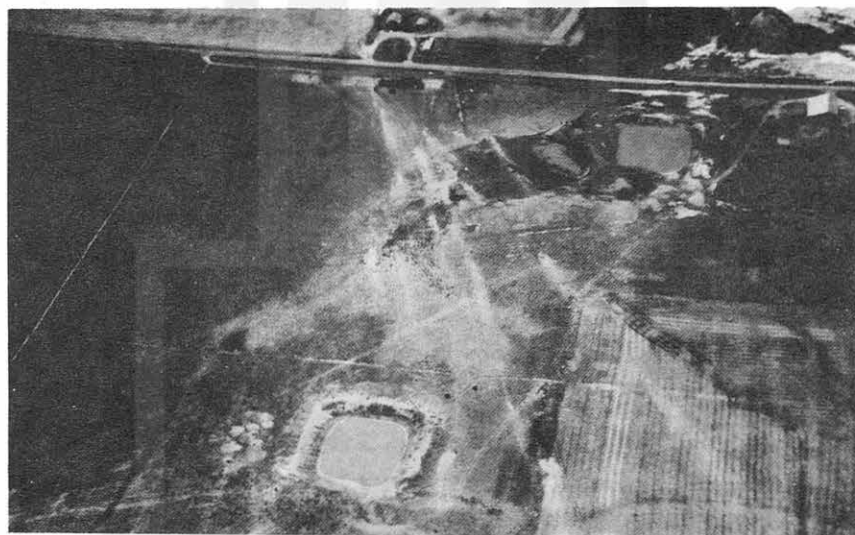
米国の主要な空港およびその周辺でのジェット機の安全運航を確保するため、FAA（連邦航空局）は走査（レーダーで1度可視範囲を見渡すこと）後、20から40秒以内に自動的にマイクロバーストを検知し、1 から2 分毎にデーターを更新できるような、パルス波を使用したドップラー・レーダーを開発中である。



このようなレーダーが使用可能となるまでは、現在使用中のドップラー・レーダーを使ってマイクロバーストを効率的に探知することは、まず不可能であろう。



<図1.6> 1977年9月30日、イリノイ州ダンビル付近で撮影したマイクロバーストにより平らに押しつぶされたとうもろこし畑。右側の写真は、左の枠で囲んだ部分の望遠写真である。藤田撮影。



<図1.7> 1979年4月10日、オクラホマ州で撮影したマイクロバースト中の直線状の風のパターン。左下から右上に走っているヒッカキ傷のような線は、風とは関係のない牛やタイヤの跡。藤田撮影。

第 2 章

マイクロバーストと

マクロバーストの観測

ダウンバーストは、地上あるいはその付近で破壊的な風の吹き出しを起こす強い下降気流である。この強風は、直線または曲線状に吹き、強力に発散する。ダウンバーストのサイズは、1キロメートル以下から数十キロメートルに至るまで様々である。従って、強風の水平方向の規模により、ダウンバーストはマクロバーストと、マイクロバーストに分類される。

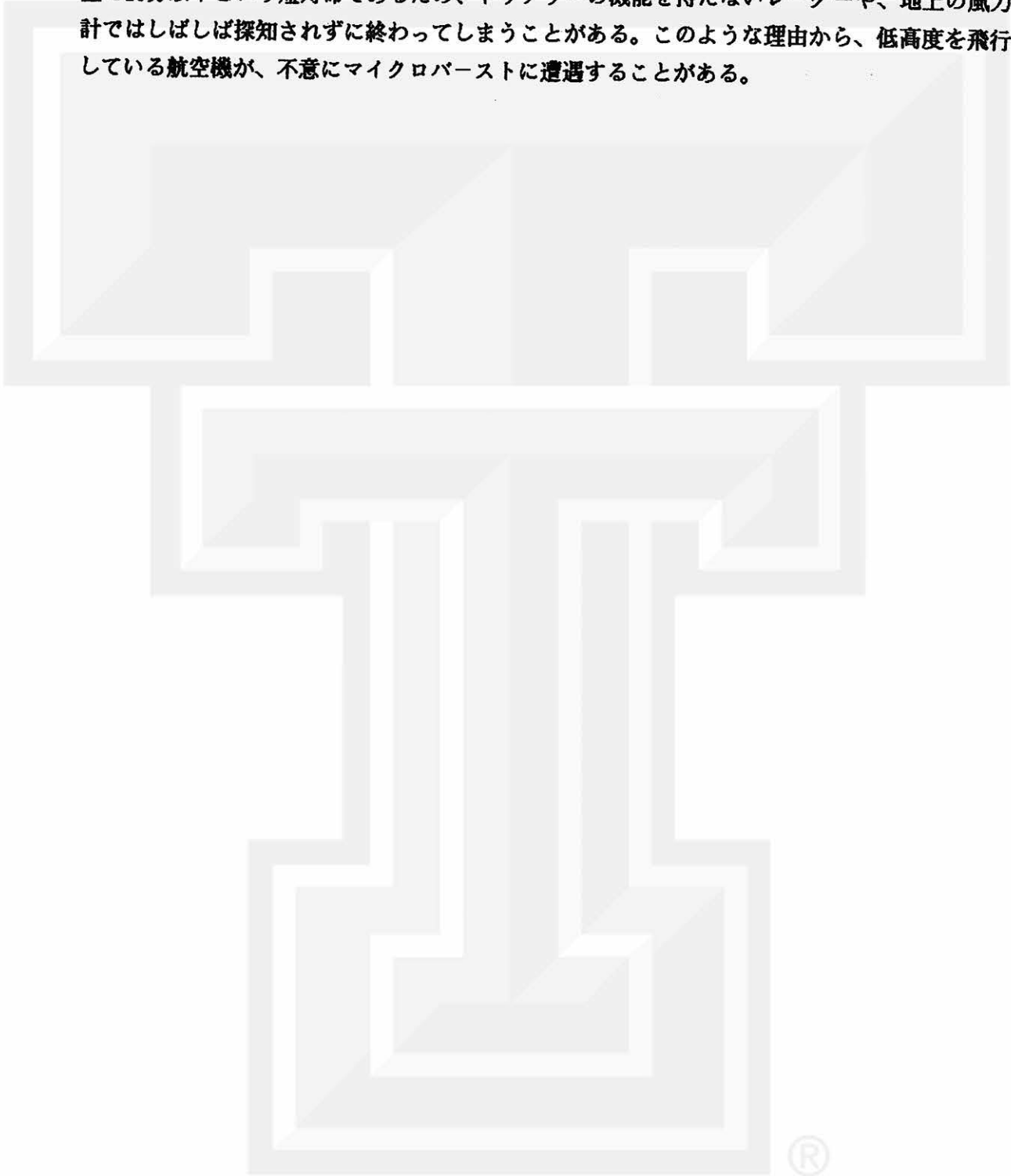
マクロバースト : 大型のダウンバーストで、風の吹き出しは、水平方向に4キロメートル(2.5 マイル)以上広がる。強烈なマクロバーストは、広範囲にわたってしばしばたつまきに似た被害を及ぼす。強風は5分から30分間続き、60メートル/秒(時速 134マイル)に達することがある。

マイクロバースト : 小型のダウンバーストで、風の吹き出しは、わずか4キロメートル(2.5 マイル)かそれ以下である。しかし、小型でありながら、強風は75メートル/秒(時速 168マイル)に達することがある。

2.1 惑星と気象現象の比較規模(Planetary Scale)

1981年藤田によって考察され提唱された気象現象の規模は5種類から成り、母音A-E-I-O-Uの順に構成されている。それぞれの長さの尺度は、100分の1の幅の段落で区切られている。表2.1に示されているように、メソスケールのじょう乱が1つからいくつかの州に広がるのに対して、マイソスケールのじょう乱は主要な空港か、それ以下の面積にしか及ばない。言い換えるならば、マクロバーストが数州に影響を及ぼすことがあるのに対し、マイクロバーストの発生と消滅は空港内に限られ、空港の外部にいるものには気付かれなことがある。ごく小さなマイクロバーストに至っては、他の滑走路には影響を与えないのに、1本の滑走路だけに重大な障害を与えることがある。

前述の気象規模に照らして言うならば、マクロバーストはメソスケールのダウンバーストであり、マイクロバーストはマイソスケールのダウンバーストである。マイクロバーストは、小型で10分以下という短寿命であるため、ドップラーの機能を持たないレーダーや、地上の風力計ではしばしば探知されずに終わってしまうことがある。このような理由から、低高度を飛行している航空機が、不意にマイクロバーストに遭遇することがある。



同じような事態は、道路上を走行している乗用車やトラック、あるいは河、湾、海上を航行しているボートや艦船にも発生する。

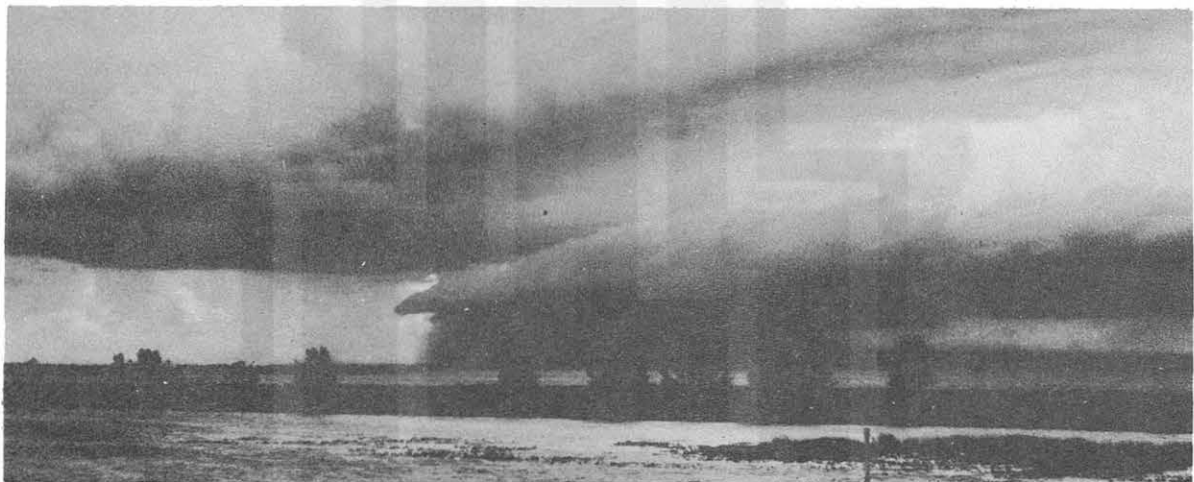
<表 2.1> 藤田による惑星と気象現象の比較規模 (1981年考案)。

地球の円周40,000キロメートルからえんどう豆のサイズ4ミリメートルまで、順次段階的に減少してゆく。

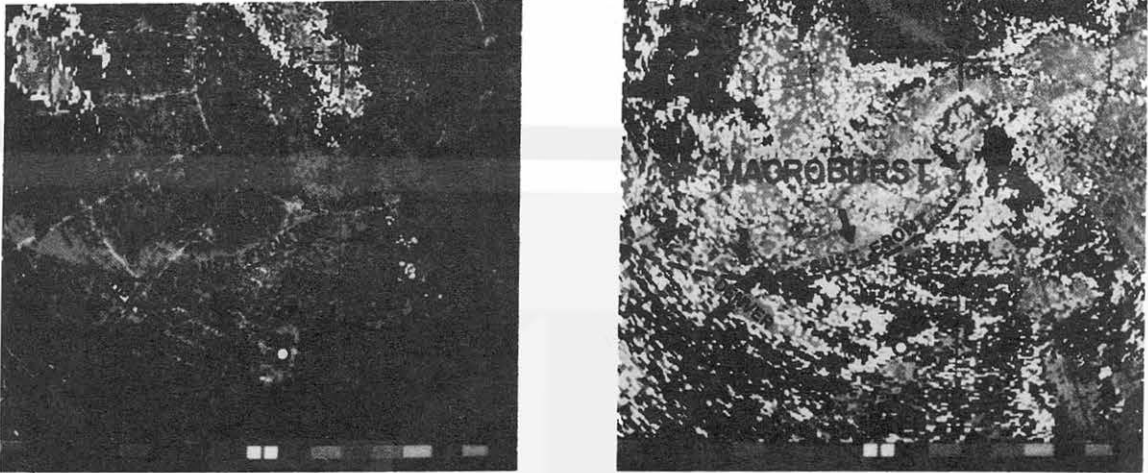
寸法 (長さ)	40,000-400km	400-4km	4km-40m	40m-40cm	40cm-4mm
スケール人	MASOscale	MESOscale	MISOscale	MOSOscale	MUSOscale
読み方	マ ソ	メ ソ	マイソ	モ ソ	ミューソ
ダウンバースト		マクロバースト	マイクロバースト		
サイクロン (旋風)	ハリケーン	台風	トネード	たつき 砂 嵐	乱流の渦

2.2 マクロバーストの外観

水平方向に大きく広がった規模を持っているマクロバーストは、雨雲の下から次から次へと静かに降下してくる。ドームの外側へ向かって働く気圧傾度の力は、寒気を外側に押し出して、寒気前線の背後に突風を吹かせる。ガストフロントとは、雲底からはるか彼方まで寒気を押し出す突風の前線である。(図2.1)。図2.1は、寒気のドームを他の雲から切り離しているガストフロント〔前線のように帯状をした突風域〕が、突風の最前面となっている様子を示している。

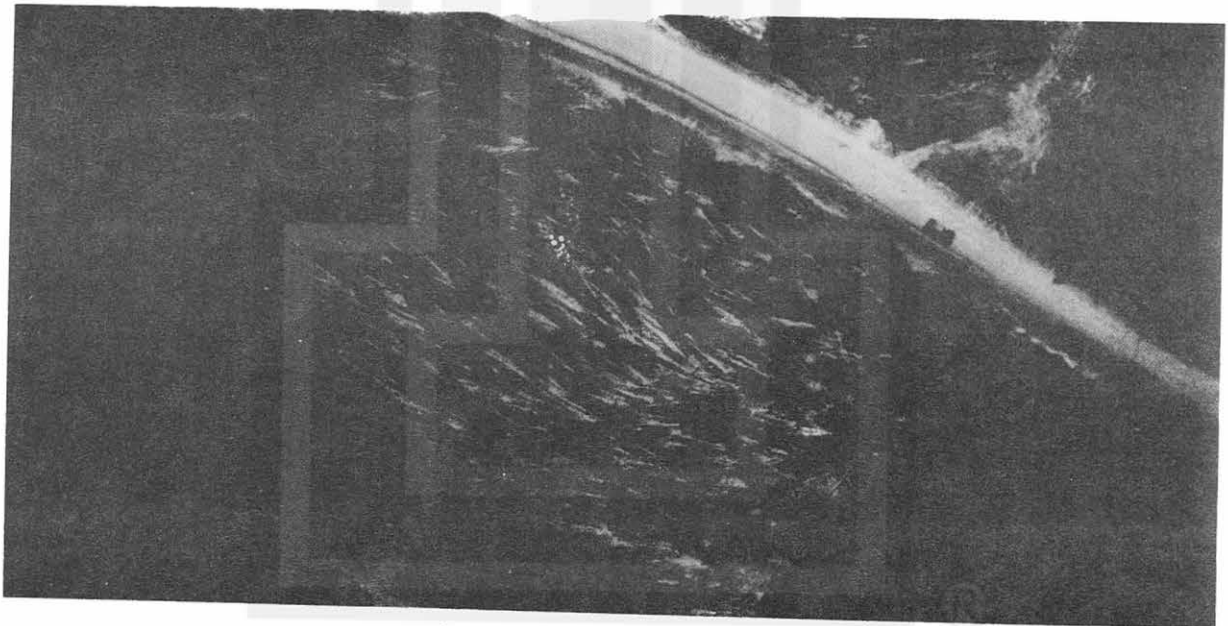


<図 2.1> 1975年8月12日、フロリダ州オキチョビ湖付近で撮影した、マクロバーストの前面の様相。前面の特徴は、ロール状の雲、砂塵、突風等々である。ロン・ホーリィ氏撮影。



<図2.2> 1982年7月14日14時40分15秒 MDT、CP-3 ドップラー・レーダーで捕らえたガストフロント（黒の破線）と、マイクロバースト（赤と白の円）。反射率（強度を表す）（左）と速度（風速を表す）（右）の写真は、マクロバーストとマイクロバーストの水平方向の規模の違いを、ハッキリと示している。

ドップラー・レーダーで捕らえたマクロバーストの特徴は、画像の上で弧を描いており、ガストフロントの後面に広域のプラス（レーダーより遠ざかる）またはマイナス（レーダーに近づく）の速度場が存在することである。図2.2は、デンバーの北部に発生したマクロバーストの速度と反射率の場を示している。



<図2.3> 1977年7月4日、ウイスコンシン州北部に発生したマクロバーストによって倒された、ソーヤー郡の数百本の木々。藤田撮影。

ガストフロントは、バンド状の最高 10 dBZ 程度の反射エコーとして見える。また、ドップラー速度はガストフロントに沿って、急激に変化している。

1977年7月4日北部ウイスクンシン州に大型で強度なマクロバーストが発生し、いくつかの郡が強風の直撃を受けた。樹木や物件の損壊は、はじめ超大型のたつまきによるものとされたが、著者の広範囲にわたる空中調査と、その後の解析によれば、たつまきの形跡は発見できなかった。だが、幅17マイル(27キロメートル)、長さ 166マイル(267 キロメートル)に及ぶ被害地域の中に、25個のマクロバーストが発見された。この北部ウイスクンシン州マクロバーストで被害を受けた地域での最大風速は、藤田のたつまき測定尺度でF 2、時速 113-157 マイル(50-70メートル/秒)と推定されている。図2.3 および図2.4 に見るように、樹木はマッチ棒のように吹き倒され、小屋や納屋はマクロバーストの風によって屋根をはがされたり、押しつぶされている。

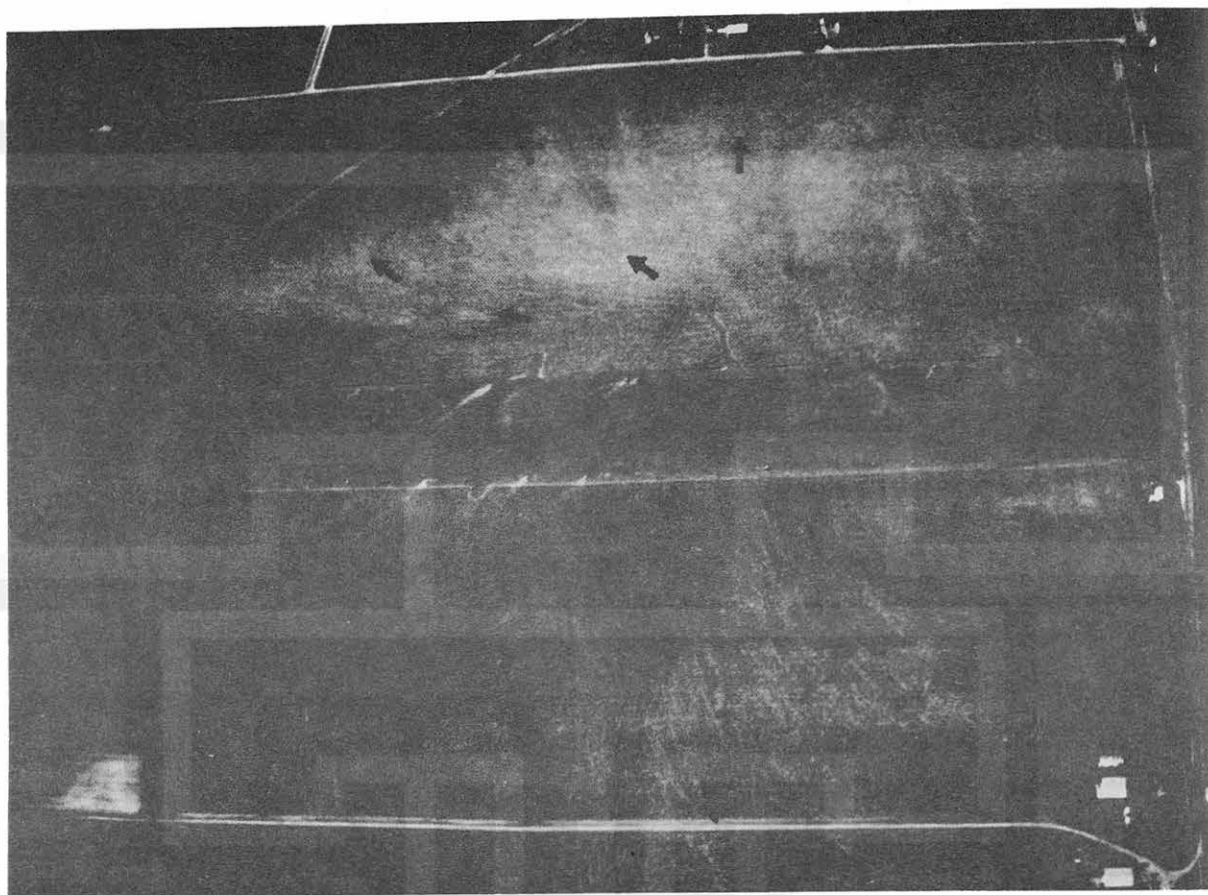


<図2.4> 1977年7月4日のマクロバースト・ストームによって倒壊したウイスクンシン州フィリップス付近の納屋。ストームの直後、この地域の住民はこれをたつまきの被害として報告した。藤田撮影。

2.3 マイクロバーストの形状

低空飛行による空中撮影の経験を積んだ気象学者達は、マイクロバーストが残した被害写真を撮る際に、飛行高度や飛行姿勢を正しく決めることができる。

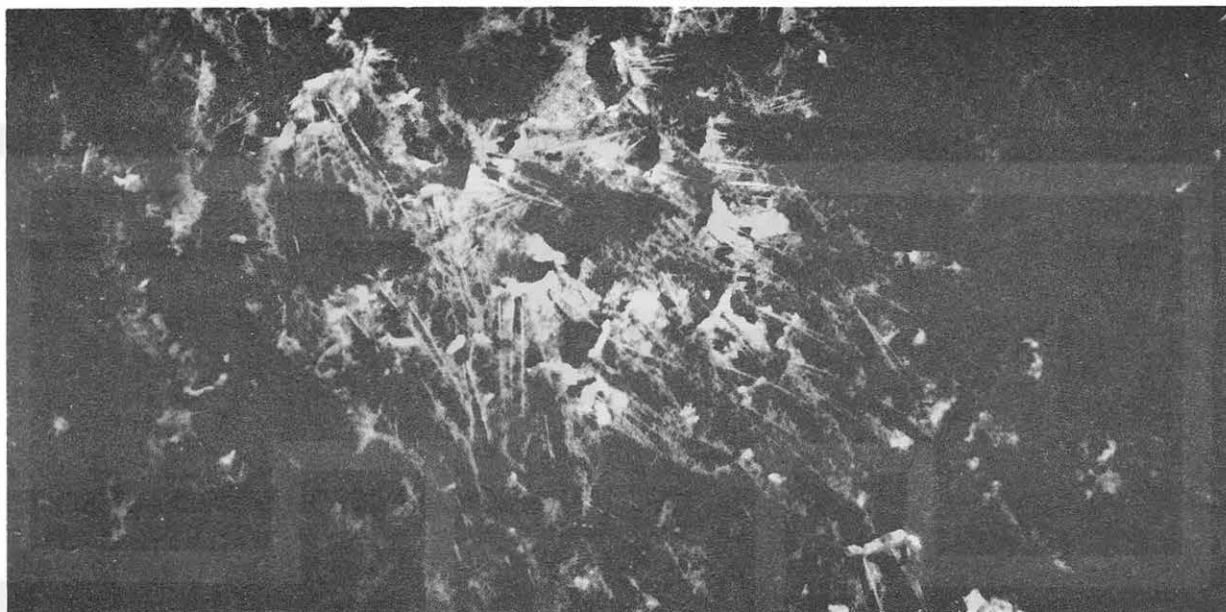
図2.5の空中写真は、6000フィート(1.8 キロメートル)の高度で、太陽から40ないし50度離れた方向に向かって撮影したものである。このように太陽光線から離れた適切な角度を選ぶことによって、被害を受けたとうもろこしからの反射光を増し、それを薄い灰色に写し出す



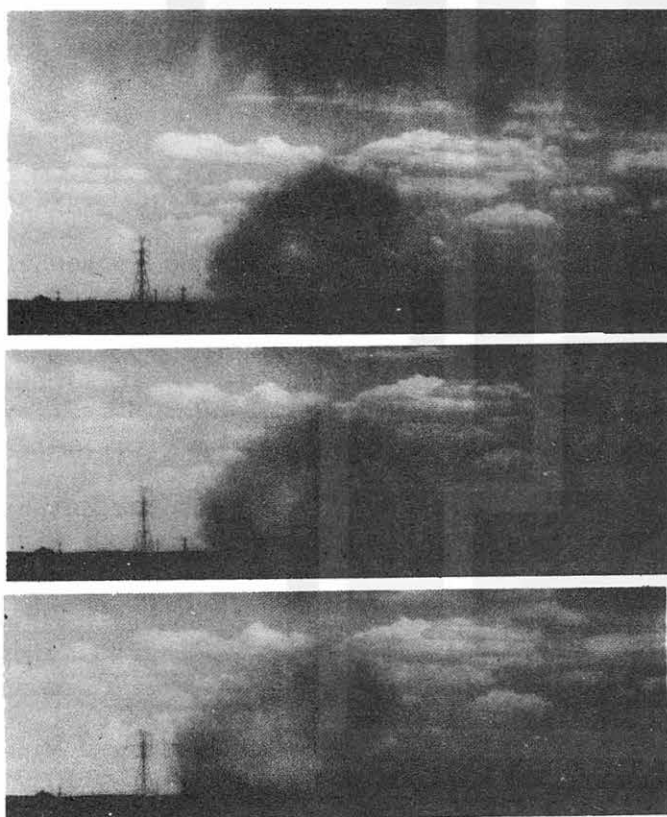
<図2.5> 1977年9月30日、インディアナ州ゲッシー付近に降下した、マイクロバーストの全景。 藤田撮影。

ことができる。図中、黒の矢印で強調した被害の跡は、マイクロバーストの降下地点から周囲に発散した風が、反時計方向（航空機に向かう方向）と時計方向（航空機から遠ざかる方向）の両方向に吹いたことを明瞭に示している。明らかに、このマイクロバーストの下降気流は、図中の右から左に移動しながら、地面を斜めに直撃している。

小型で強烈なマイクロバーストは、しばしば完全なスターバースト状の樹木の倒壊をひきおこす。もしマイクロバーストの中心から半径 100メートルの円内に吹き出す風速を25メートル/秒（時速56マイル）と仮定すると、円内の平均発散は毎秒0.5 となる。このような強い発散を地表面で起こさせるためには、下降気流の速度は地上10メートル（33フィート）で5メートル/秒（毎秒16フィート）、地上20メートル（66フィート）では10メートル/秒（毎秒33フィート）となるはずである。つまり、スターバーストの中心における下向きの流れは、木の頂上付近の高さにおいても、かなり強いことになる。（図2.6）



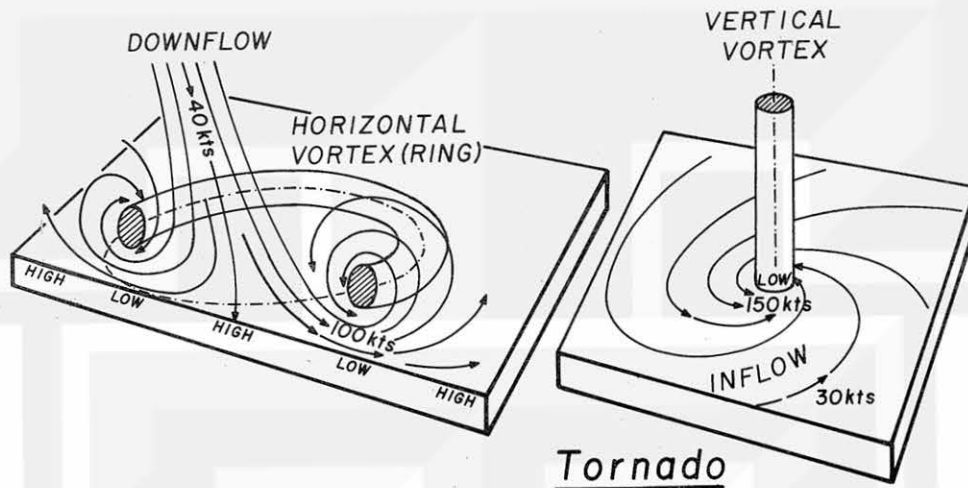
<図2.6> 1977年7月4日の北部ウィスコンシン・マクロバーストの中に潜在していた激烈なマイクロバースト。この写真は、下降気流が広がる前に、木の頂上の高さにまで降下してきたことを示唆している。 藤田撮影。



<図2.7> マイクロバーストの吹き出し前面の先端の直ぐ後ろに形成された、砂じんの巻き上がりを示した連続望遠写真。

この写真は1982年7月15日、JAWS の観測中CP-3レーダー基地から南に向いて撮影した。ブライアン・ワラノスカス氏撮影。

マイクロバースト内で非常に強く吹き出す風に比べて、その境界面は割合にゆっくりとした速度で外側に広がってゆく。砂じんによって風の様子が見える写真には、風はしばしば水平方向の軸を持った渦が写っている。この水平方向の渦が下降気流の中心を取り巻き、リング状の渦を形成すると、このリングの下に吹き出す風は、リング自体が拡大するので、連続的に加速されるのである。(図2.7、2.8)

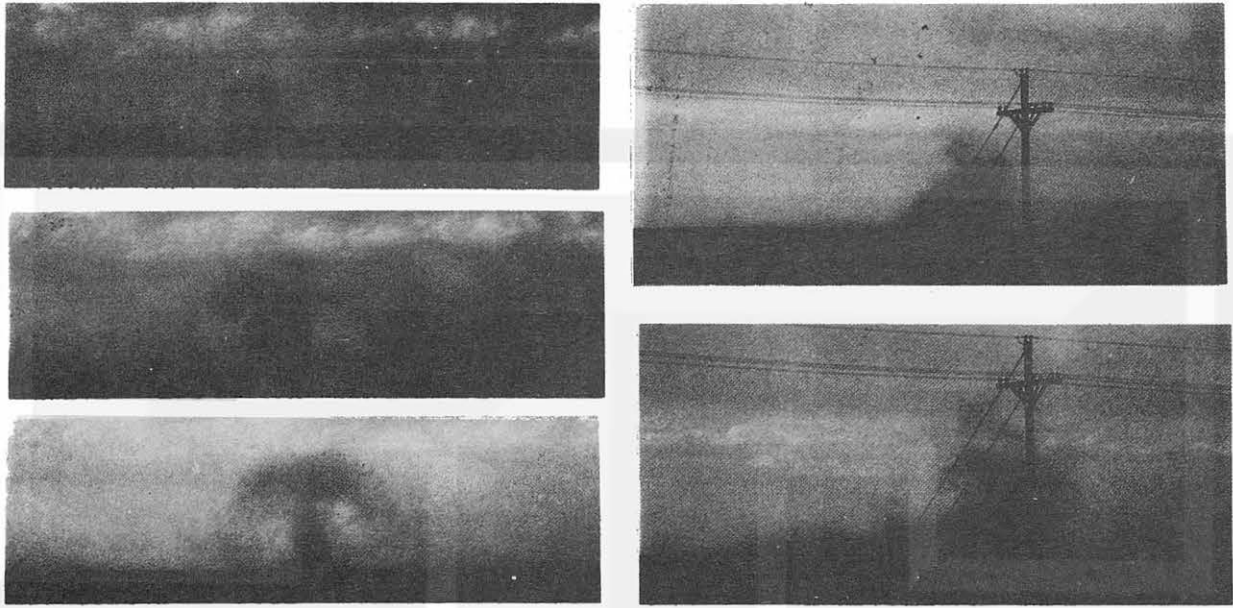


<図2.8> たつまきの垂直軸の渦(棒状)と、マイクロバーストの水平軸の渦(環状)の概念図。

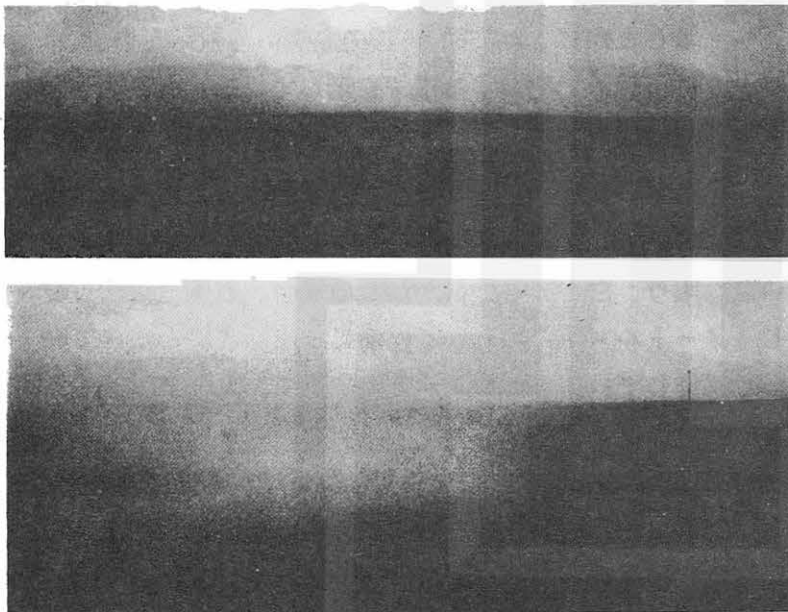
図2.9は、砂じんが水平方向の軸を持つ渦に変わってゆく様を見せている。左側の3枚の写真は、水平方向の渦があたかも大型の砂旋風か、薄い砂の傘をいただいた砂たつまきのような垂直方向の渦に変化してゆくという、あまり見られない過程を捕らえている。

接近してくるマイクロバーストの前面にある砂の雲を観測することは、いささか興味深いことである。1982年7月8日の13時44分 MDT、JAWS 観測中 CP-3 レーダー基地に設置された PAM は、18メートル/秒(時速40マイル)の風を記録した。13時43分30秒と13時44分25秒 MDT に撮影した図中の2枚の写真は、接近中の砂嵐が図に見える PAM を直撃した様子を捕らえている。続いて砂じんが著者がいた CP-3 レーダー基地に達したとき、1から2分間続いた突風によって、視界はゼロとなった。それは著者が経験した最も強烈な砂じんであった。

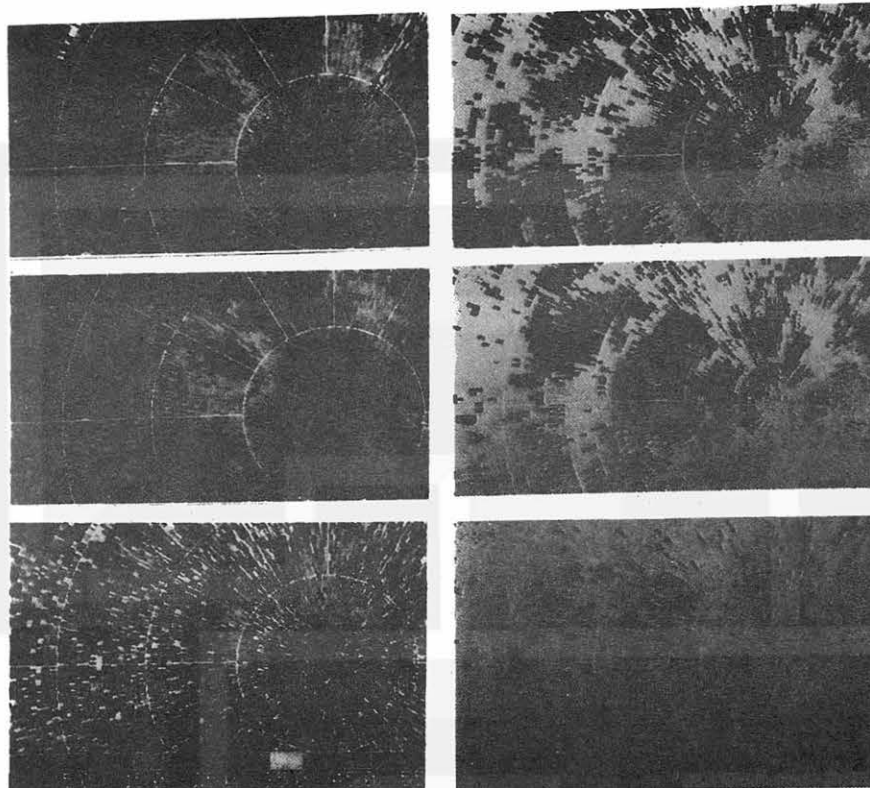
ドップラー・レーダーは、マイクロバーストの風を測定し、表示する有力な装置である。図2.10 に示したマイクロバーストは、CP-3 レーダー基地が最大風速を記録した4分前、3つの高度角のPPI モードで走査し、撮影したものである。この PPI の写真は、2キロメートル毎のレンジ・マーカーで区切られているが、高度角 0.0度では13メートル/秒、2.4度と 4.8度では15メートル/秒で接近しているマイクロバーストの風を示している。(図2.11)



<図2.9> 1982年7月18日 JAWS 観測中、消滅期のかなとこ雲の下でマイクロバーストによって巻き上げられた砂じんの数々。左の写真は北北東に向けて17時44分35秒、17時45分45秒、17時45分55秒 MDT に撮影したもの。右側は東北東に向き、17時58分30秒と17時58分55秒 MD T に撮影した。ジョー・ゴールドン氏撮影。



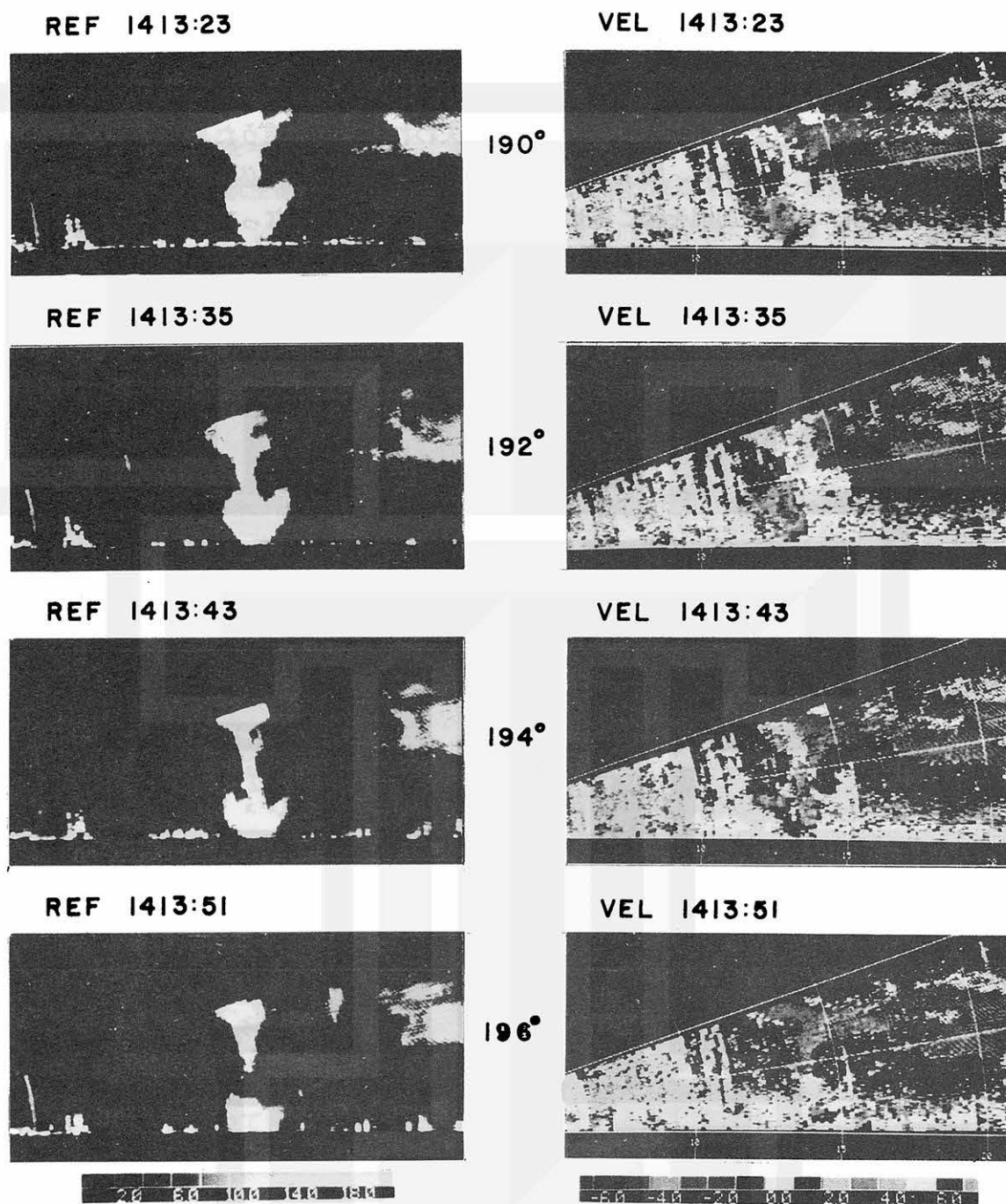
<図2.10> 1982年7月8日、CP-3レーダー基地に接近中の砂じん。上の写真は西に向き、13時43分30秒 MDT に撮影したもので、画面内に見える PAM が18メートル/秒（時速40マイル）の最大風速を記録する直前のものである。下の写真は、砂じんが CP-3レーダー基地を直撃する寸前のものである。写真は CP-3レーダー基地から西を向き、藤田が撮影した。



< 図2.11 > 1982年
7月8日、CP-3ドッ
プラー・レーダーで捕
らえた図2.10のマイ
クロバーストの強度と
速度の画像。上から13
時40分12秒高度角 4.8
度、13時39分48秒高度
角 2.4度、13時39分23
秒MDT 高度角 0.0度。
このマイクロバースト
の発生から消滅までの
生涯は、CP-3レーダ
ーによって観測され、
撮影された。

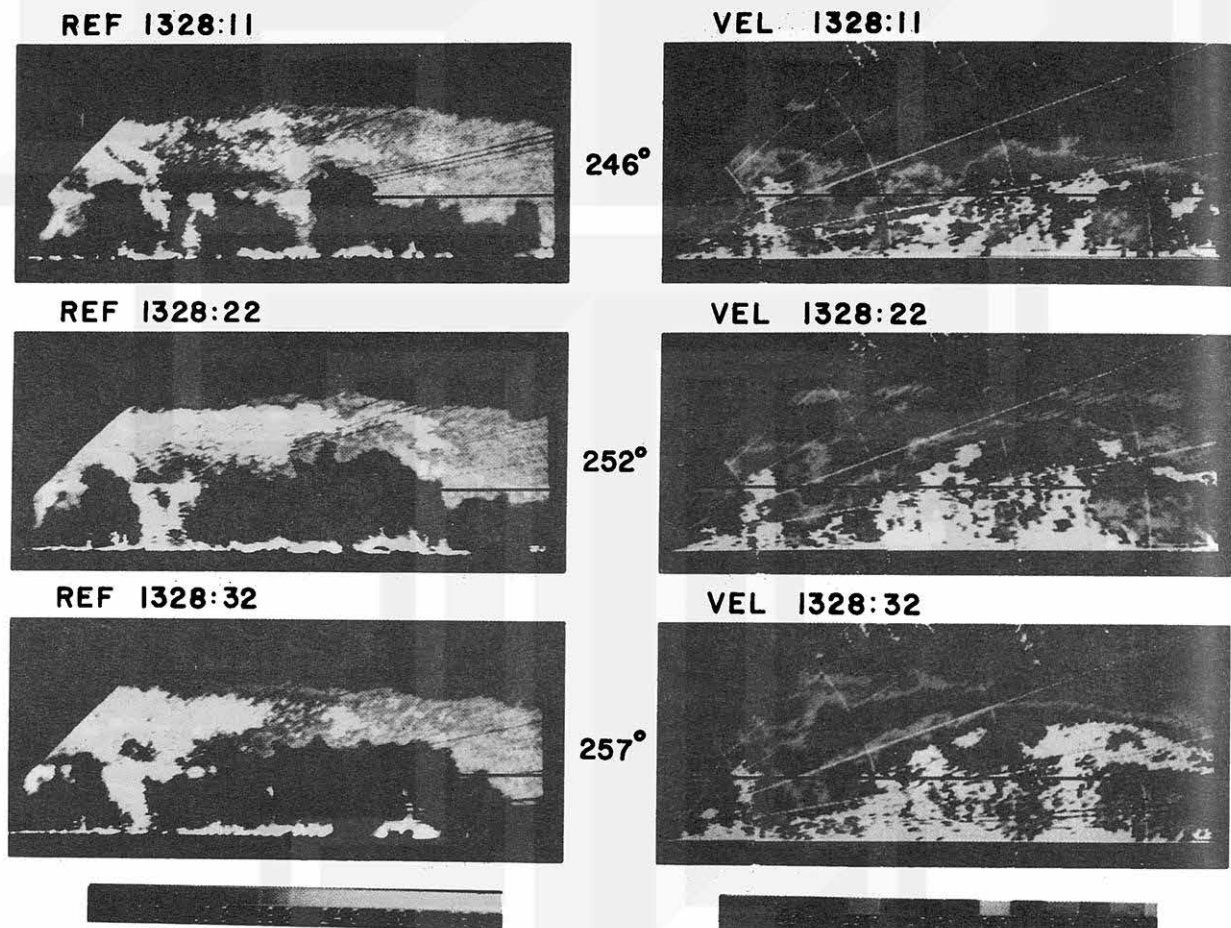
ドップラー・レーダーによる RHI 走査は、マイクロバーストの垂直の構造を知る上で非常に役に立つ。1984年6月12日、バーガがステイプルトン空港の上空を通過した際、CP-3レーダーは降下してくるバーガの断面を捕らえることができた。図2.12の左側の4枚の写真は、降下しているバーガの垂直軸と、エコーが地上付近で発散する様子を示している。右側のドップラーの速度画像は、着地点のレーダー側では接近する速度、その反対側では後退する速度を示しており、それは着地点付近から吹き出している風の存在を示している。高層ではそこに流れ込む気流があるため、色の分布は逆転している。空気の発散のない中層、すなわち速度ゼロの部分の色は、下降気流が回転していない限り、白となる。しかしこの場合、右側〔最大方位角〕の下降気流の軸の色は、2ないし4メートル/秒で接近していることを示す緑となっている。これは下降気流の軸が、時計方向に回転していることを示す証拠である。

RHI 走査でわかったマイクロバーストに関するもうひとつの重要な事実、下降気流が融解高度で加速する、ということである。図2.13で示した RHI 走査による断面図は、地上 2.4キロメートル (7,900 フィート) の高度に、高輝度のバンドの存在を示している。レーダーから3から5キロメートルの距離にあるこのバンドは、氷晶が解けるために、降下速度が緑 (-3メートル/秒) から紫 (-12メートル/秒) へと、9メートル/秒ほど加速している高度に位置している。このバンドからの下降気流は、まだ地表には達していない。



<図2.12> 1982年6月12日コロラド州デンバー、ステープルトン空港上空に発生したマイクロバーストの RHI 走査による断面図。この写真撮影のため、CP-3 レーダーは方位角 190 度、192度、194度、196度の方向で走査した。

レーダーから7から8キロメートルの距離にあるもう1つの高輝度のバンドは、地表面で発散している気流に伴うもので、下降気流がマイクロバーストの段階に発展したことを示している。雲頂近くからこのバンドにかけて広がる強い接近気流（レーダー側に近づいてくる気流）は、地上に降下したマイクロバーストの風によって失われた大気を補うために、流入してくる気流の可能性が強い。この例は、降下してくる氷晶を融解するために必要な80カロリー／グラムの熱が、下方へ大きな加速を起こさせる重要なエネルギー源となっていることを強く示唆している。



<図2.13> CP-3ドップラー・レーダーによって捕えたマイクロバーストの RHI 断面図、走査はそれぞれ方位角 246度、252度、257度に向け、13時28分11秒、13時28分22秒、13時28分32秒 MDT に行われた。左側の反射率の写真上の高輝度のバンドは、地上 3.4キロメートル（11,000フィート）に位置している。このバンドは右の速度写真では、水平の黒い線で表している。

第3章 マイクロバーストに起因した航空機事故

航空機の運航に影響を与える気流は、“乱気流”と“ウィンド・シアー”とに大別することができる。乱気流中の航空機は、おおよその決められた飛行経路を維持しながらも、不規則な動きをする。ウィンド・シアーは乱気流の有無にかかわらず航空機に作用する揚力に変化を与え、その結果顕著な沈下や上昇を招くのである。

気象学においては、ウィンド・シアーとは与えられた方向における風速の局地的な変動である。ウィンド・シアーの3つの成分は、風速を W とすると下記の様に表すことができる。

$$W = i u + j v + k w \quad (3.1)$$

i, j, k は x, y, z の方向に向いた単位ベクトルであり u, v, w はその風のベクトルの x, y, z 成分である。

航空界における、ウィンド・シアーとはある航空機の進路上の風速の時間的変動である。そしてそれは以下の様に表される。

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = G \frac{\partial W}{\partial L} + \frac{\partial W}{\partial t} \quad (3.2)$$

ここでは L は飛行経路に沿って計った距離である。この等式の右辺の2つ目の項は、航空機の通過した場所における風系の出現や、発達に起因する風の局地的な変動を表す。すなわち2つ目の項は、航空機の通過以前には存在していなかったかも知れないのである。それに対して1つ目の項は、航空機が現存するウィンド・シアーの中を飛行することによって起こる風の変化を表すものである。

図式(3.1)において飛行経路は $X-Z$ 平面の含まれるとして、 u, v, w の3つの風の成分のシアーを以下の様に表すことができる。

$$-\frac{\Delta u}{\Delta t} = \text{向い風のシアー, } + \text{向い風; } - \text{追い風} \quad (3.3)$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \text{横風のシアー, } + \text{右からの風; } - \text{左からの風} \quad (3.4)$$

$$\frac{\Delta w}{\Delta t} = \text{垂直の風のシアー, } + \text{上向き風; } - \text{下向きの風} \quad (3.5)$$

3.1 ウィンド・シアの揚力への影響

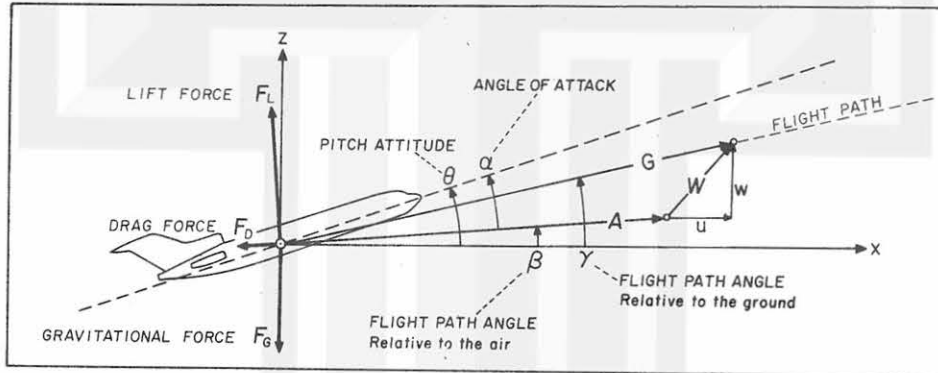
3次元の風Wの中を真対気速度Aで飛行する航空機は、対地速度Gで移動する。航空機に作用する揚力はベクトルAに直角であり、抗力はベクトルAと反対の方向を向く。図3.1の記号を使うと、揚力は以下の様になる。

$$F = \frac{1}{2} \rho A^2 C_L S \quad (3.6)$$

ρ は、空気の密度、 C_L は揚力係数、 S は揚力が航空機に作用する面積である。 β の値は小さく、かつ θ と G は風が時間的に急変するほど変化しないので、対地速度と迎え角は下記のように概算することができる。

$$G \cong A + u \quad \text{or} \quad 0 = \frac{\Delta A}{\Delta u} + 1 \quad (3.7)$$

$$\alpha = \theta - \gamma + \frac{w}{G} \quad \text{or} \quad \frac{\partial \alpha}{\partial w} = 0 - 0 + \frac{1}{G}. \quad (3.8)$$



<図3.1> この章で用いた変数の定義、 F_L --揚力、 F_G --重力、 F_D --摩擦力、 α --迎え角、 β --対気飛行経路角、 γ --対地飛行経路角、 θ --ピッチ角、 W --風ベクトル、 u , v , w --風ベクトルの x , y , z 成分、 A --真対気速度、 G --対地速度

u と w の変化による揚力の増加は、等式(3.6)を微分することによって算出できる。

$$\Delta F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A^2 S \left(\frac{2}{A} \frac{\partial A}{\partial u} \Delta u + \frac{1}{C_L} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial w} \Delta w \right) \quad (3.9)$$

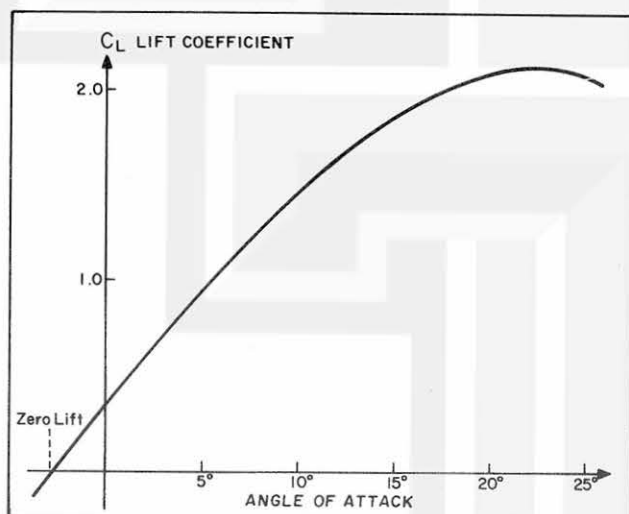
等式(3.7)、(3.8)から(3.9)は以下の様に簡素化できる。

$$\frac{\Delta F_L}{F_L} = -\frac{2}{A} \Delta u + \frac{k}{G} \Delta w \quad (3.10)$$

$$k = \frac{1}{C_L} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \quad (\text{ラジアン}) = \frac{180}{\pi C_L} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \quad (\text{度}) \quad (3.11)$$

上記の式〔3.11〕は、ウィンドシア―通過中の揚力の特性によって決定される。この等式は揚力の減少が、対気速度の減少のみならず、迎え角の減少に伴う揚力係数の低下によっても生じるということを述べている。

後退翼を持つ航空機のフラップ ダウンで離陸中の典型的な C_L 曲線が図 3.2 である。その図から算出した表 3.1 の値は飛行中の航空機の迎え角に関係なく、追い風による揚力の減少は一定であることを示している。また一方では、揚力の損失は迎え角の減少によって著しく増加する。等式〔3.10〕は、追い風下降気流の中で対気速度を得るためにピッチ角を下げることは、結果的には揚力の減少、さらには極度の沈下を招くことを示唆している。



<図 3.2> 15° フラップ、ギア上げ状態の後退翼機の揚力係数。迎え角は翼の取り付け角と同じ。翼に対する迎え角は取り付け角より約 2° 大きい。

<表 3.1> 追い風及び下降流がそれぞれ 1 ノット増した場合の揚力の減少の割合 (%)。簡略化のために $A = G = 150$ ノットと仮定した。

迎え角	0°	5°	10°	15°	20°	
追い風による揚力減少	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	パーセント/ノット
下降気流による力減少	13.2	4.5	2.5	1.3	0.5	パーセント/ノット

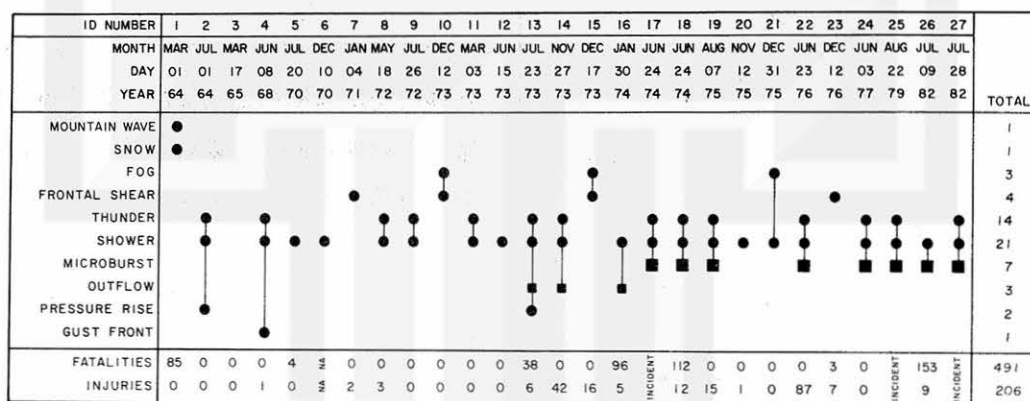
3.2 マイクロバーストに起因した事故

対流現象の中の低高度で起きた航空機事故のいくつかは、気象的な要因を主な事故の原因とせず、パイロットのミスによるものとされていた。

1983年に国立科学アカデミーから発行された「低高度におけるウィンド・シアーとその航空機への障害」と題されたウィンド・シアーに関する総合的なレポートには1964年から1982年までの間に合衆国内で起こったウィンド・シアーに関連した事故を27例載せている。これらの事故やインシデントに関連した10種類の気象状態をまとめたのが図3.3である。この図によれば78%にあたる21例が降雨に関連し、低高度におけるウィンド・シアーが雷雨と同様に通常の降雨によっても引き起こされることを示している。

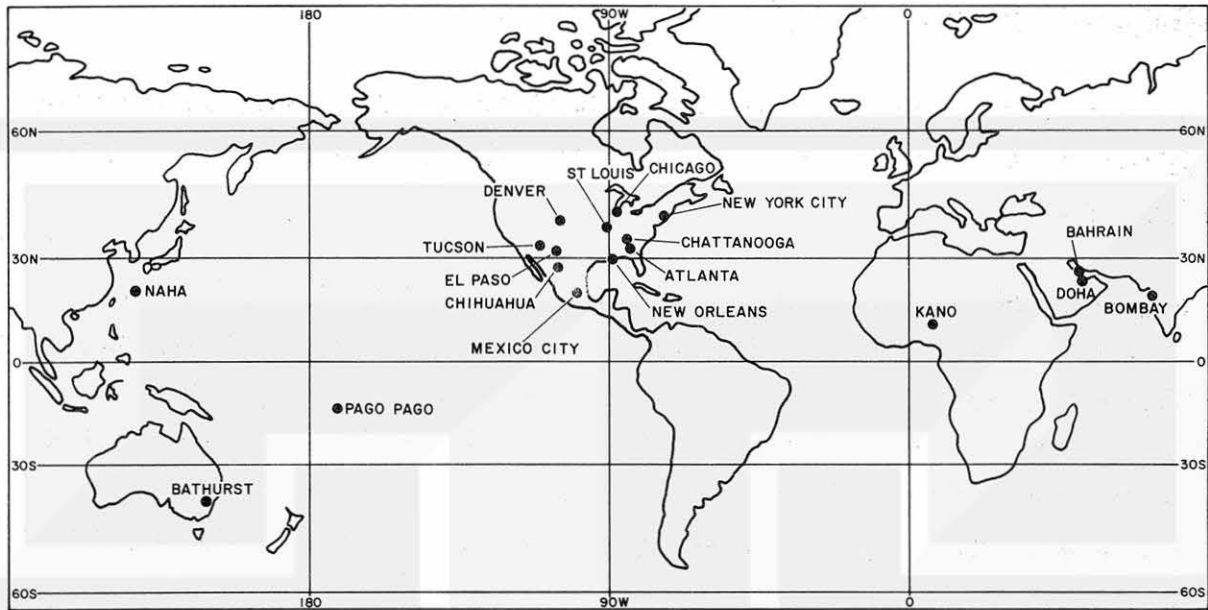
1975年に著者がJFK空港でのイースタン66便の事故調査を行って以来、マイクロバーストに起因するウィンド・シアー関係の事故が7件発生している。(図3.3の赤い四角)

1973年7月23日から1974年1月30日までの間に、吹き出しに関連した3件の例がある。これらの吹き出しはみな降雨と共に起こっており、これらの吹き出しがマイクロバーストであった可能性を示唆している。1964年と1973年の2つの気圧上昇の例は多分マイクロバーストのガス・フロントによるものではないと思われる。



<図3.3> 1964年3月1日から1982年7月28日にかけて起こった27個の事故/インシデントの推定原因。「低高度におけるウィンド・シアーと航空上の危険性」(国立科学アカデミー、1983年)

これまでに著者の知り得たマイクロバースト関係の事故/インシデントは、図3.4に示してある。事故/インシデントが米国に集中しているということは、必ずしもマイクロバーストがこの地域において頻繁に発生するということを意味しているわけではない。それはマイクロバースト・ウィンド・シアーについての確かな知識に基づいた事故調査の結果であり、また離着陸回数の多いことによるものである。熱帯地域、諸島、海岸沿い、内陸部においても事故例がまれにある。南半球のオーストラリア パーストにおいても1件報告されている。マイクロバーストに起因したウィンド・シアーの知識が国際航空界に広く知れ渡りようになって初めて、マイクロバーストによって引き起こされるウィンド・シアーが、世界中の離着陸中の事故/インシデントの重要な原因であることが認識されるであろう。



＜図3.4＞ 世界で起こったマイクロバーストに起因する航空機事故/ インシデントの場所。1984年12月現在著者の手もとにある確認及び未確認情報に基づいて作成した。

3.3 離陸中の事故

航空機が離陸直後にマイクロバーストに遭遇するとした場合、下降気流域に入るにつれて上昇率は低下してくる。その後、下降気流が弱まるとそれは追い風が始まる徴候であり、結果として指示対気速度（IAS）の低下につながる。

表3.1 に示したように下降流の中を通過中には、迎え角が減少するので揚力も減少する。下降流による揚力減少は、迎え角が小さいと非常に大きくなる。機が高いピッチを保持しない限り、マイクロバーストの追い風部分に突入する以前に機は沈下し始める可能性がある。残念ながら、航空機は下降流を取り囲んでいる追い風部分を通過せずには、マイクロバーストから抜け出すことはできない。追い風による揚力減少は非常に危険である。なぜならば、対気速度が1ノット減るごとに揚力が1.3パーセント減少するからだ。

マイクロバースト内での下降流と追い風という悪条件が重なると、高度と対気速度が共に減少する。もしも、あるマイクロバーストが通過可能な強さであるならば、スティック・シェーカーが鳴り出すまでピッチを上げれば通過することができる。そのマイクロバーストが通過不可能な程強力であった場合、いかなる航空機もその風に進入するべきではない。そのようなマイクロバーストの早期発見と警告が不可欠である。

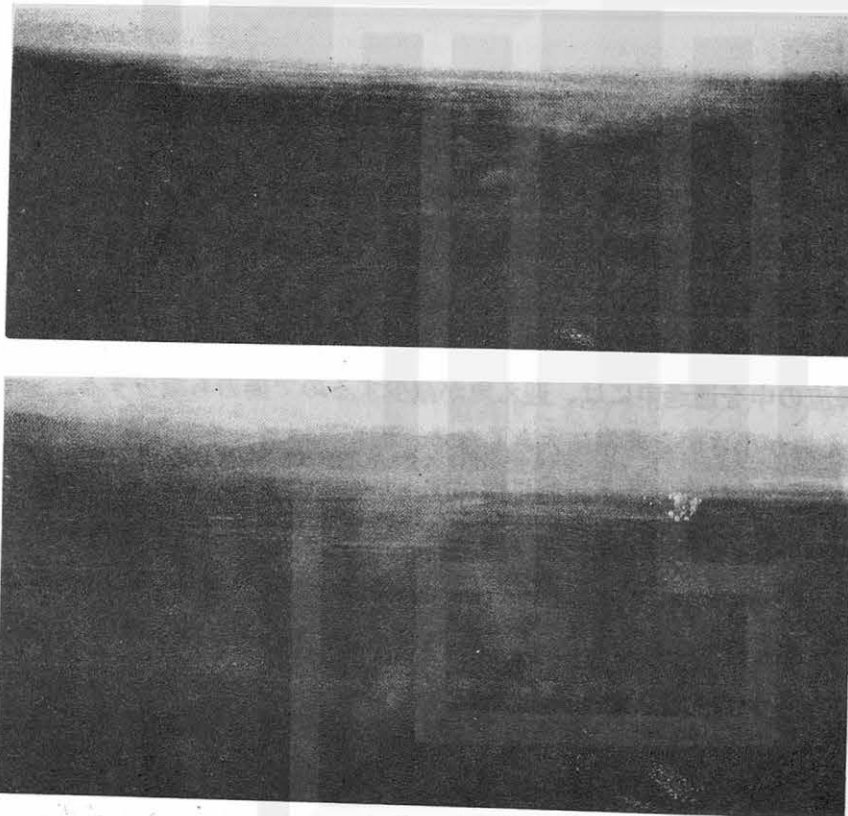
低高度における強いウィンド・シアー

マイクロバーストが地表に達してから30～60秒後の初期段階では、追い風が最大になる地点の高度は地表にかなり近い。2分～10分後には吹き出しが弱まり、同時に、吹き出しの層の厚さが深くなる。

離陸中の航空機を危険な状態に陥れるマイクロバーストの段階は、地表におけるスターバーストが始まってから1～3分間持続する。図3.5の上段の写真は、地表付近で外部に吹き出す風の危険な段階を示している。この風が吹く高さは通常、地上30メートル（100フィート）以内に限定される。このような理由で事故／インシデント機が滑走路30～45メートル（100～150フィート）で危険なまでに沈下するのである。

下段の砂嵐の写真は、上段写真の57秒後に写されたものであり、吹き出しの弱まりを示している。〔図3.5〕

この段階におけるマイクロバーストは、高いピッチと最大離陸出力をもってすれば安全に通過することができる。



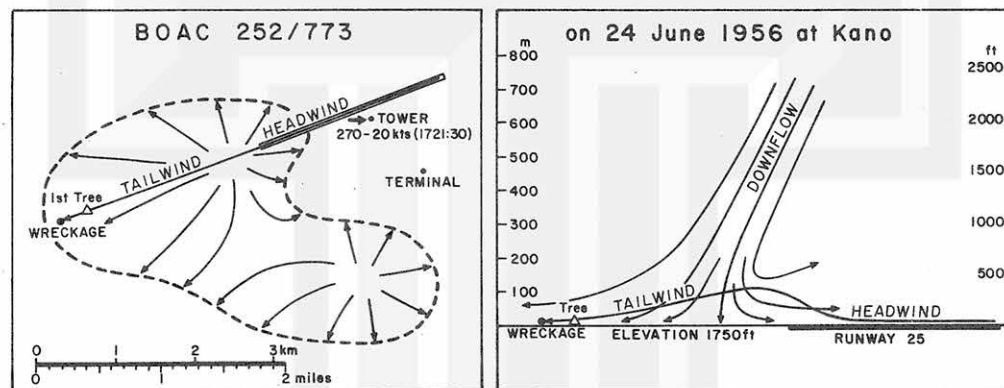
<図3.5> 1982年7月14日コロラド州デンバー市北東方向に発生したマイクロバーストの砂嵐。上の写真は15時46分04秒に撮影したもので、地表付近のジェット状の吹き出し風によって吹き上げられた砂ぼこりを示している。下の写真は、その57秒後の15時47分01秒に撮影したもので、明らかにマイクロバーストが弱まったのがわかる。

マイクロバーストに関する前述の事実が我々に教えてくれることは、同じ滑走路から直前に離陸した航空機からウィンド・シアーがなかったとの報告を受けても、続いて離陸する航空機がウィンド・シアーに遭遇する可能性があるということである。

英国航空 252/773 便の事故・・・ナイジェリア、カイノー市

著者の知るマイクロバーストに関連した事故で一番古いものは、1956年6月24日のナイジェリア、ケイノー市での事故である。

その事故報告書は、事故の21年後の1977年10月25日に著者に送られてきた。事故機が使用した滑走路の先に、小規模の吹き出しが存在したことを英国航空が確認していたことは驚きである。第2章における著者の定義によれば、この事故に関連したウィンド・シアーは規模3キロメートルのマイクロバーストによるものである。



＜図3.6＞ナイジェリア、ケイノー市における英国航空 252/773 便のマイクロバーストの水平、垂直面図である。1821 LST(地方標準時) における風の 패턴の再生図。英国運輸省女王陛下のロンドン駐在事務所提供。

その事故報告書によると英国航空の4発プロペラ機ア-ゴノートは18時21分30秒に強雨の中を滑走路中ケイノー管制塔は地表風 270° / 20ノット、視程 1,500 ヤード (1.4キロメートル) を観測した。離陸後、強雨のため視程は減少し、機は計器飛行を余儀なくされた。

機が滑走路の滑走路末端上を約100 フィート (30メートル) で通過した時、IAS は 125 ノットで、その変動は最大5ノットであった。この時点で機は 300フィート/分 (1.5メートル/秒) で上昇しており、“フラップ アップ”がコールされた。機の沈下はまだ起こっていなかった。その後 IAS は103ノットで安定していたが、機は急激に沈下していった。やがて水平飛行状態に達したが、そのときの高度はわずか 15 ~ 20 フィート (4~6メートル) であった。パイロットは上昇を試み、機はそれに反応し始めた。

その時、機は最初の樹に衝突しその後墜落した。機が停止する以前に火災が発生し、搭乗者45人のうち32人が死亡、11人が負傷し、2人が無傷だった。

コンチネンタル航空426便の事故 — コロラド州デンバー

この事故は1975年8月7日16時11分 MDT、コンチネンタル 426 便が滑走路 35L から離陸中に起きたものである。気象状態は夏のデンバー典型なもので、小規模で弱い降雨が数多く散在していた。しかしながら、その事故機は強いウィンド・シアーに突入し、滑走路の末端付近に着地した。着地後、機はスキッドしながら空港の北側境界沿いの道路東 56 番通りで停止した。134 人の搭乗者のうち 15 人は重傷を負ったが、他の人々は無傷であった。

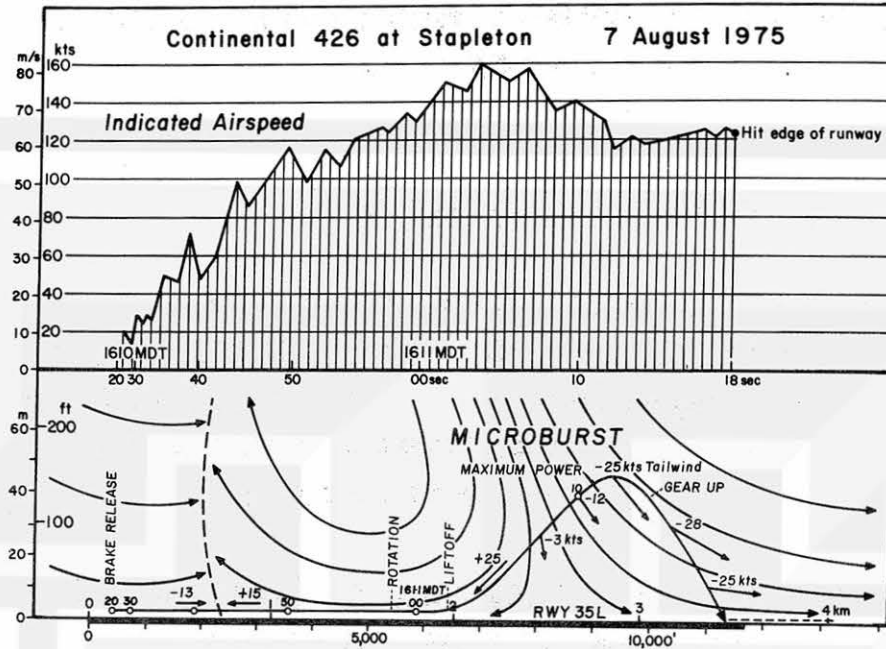
1975～76年の間に藤田とカラシナが行った気象に関連した3つの航空機事故の解析によると、他の2機の航空機がコンチネンタル 426便と同じ滑走路から数分前に離陸していた。

1605 : 36 MDT 離陸 ブラニフ 67 便 (B727)
 1608 : 03 MDT 離陸 フロンティア 509 便 (CV580)
 1611 : 02 MDT 離陸 コンチネンタル 426 便 (B727)

ブラニフ67 便は、砂じんが滑走路を東から西に通過中に、砂じんが静まるのを滑走路 35L の端で待っていた。滑走開始後、機は通常通り加速した。機が弱いシアー・ライン（風の急変する線）を通過した時、突然2～3秒の間、機はいかなる操作にも反応しなかった。そのパイロットは言った“30年間の飛行経験のなかで、こんなことを体験したのは全く初めてだ。”再びすべては平常通りになり機は離陸した。30～90メートル（100～300フィート）の高度で機は下降気流と追い風に遭遇し、IAS が15～20ノット減少した。

フロンティア509 便は先行機と同様、200フィート（60メートル）で下降流と追い風に遭遇した。しかしながら IAS の減少は25ノットであり、ブラニフ67便の場合よりもかなり大きかった。機はピッチを下げ、20秒間水平飛行をしながら速度の回復を待った。その後の上昇は通常通りだった。

コンチネンタル426 便は最大離陸出力で離陸した。離陸直前に、機は雨に突入した。通常に離陸した後、機は14度のピッチで上昇した。突然10秒間以内という短い時間の間に、機は IAS を42ノット失った。機長はピッチを10度まで下げたが、機は地面に向かって降下し続けた。
 (図3.7)



<図 3.7> コンチネンタル426便の航跡と対気速度。1975年8月7日
コロラド州デンバー、ステープルトン空港にて。

コンチネンタル426 便が遭遇したマイクロバーストの地表における最大発散率の推定値は、150 ～250/時 (0.04～0.07/ 秒) であった。これと同程度の発散が150フィート(45メートル)まで達していたと仮定すれば、それぞれの地上高度における下降流の流速は以下の通りである。

高度 50 フィート(15 メートル) にて2～4フィート/ 秒 (1 ～ 2ノット)
 高度100 フィート(30 メートル) にて4～7 フィート/ 秒 (2 ～ 4ノット)
 高度150 フィート(45 メートル) にて6～11フィート/ 秒 (3 ～ 6ノット)

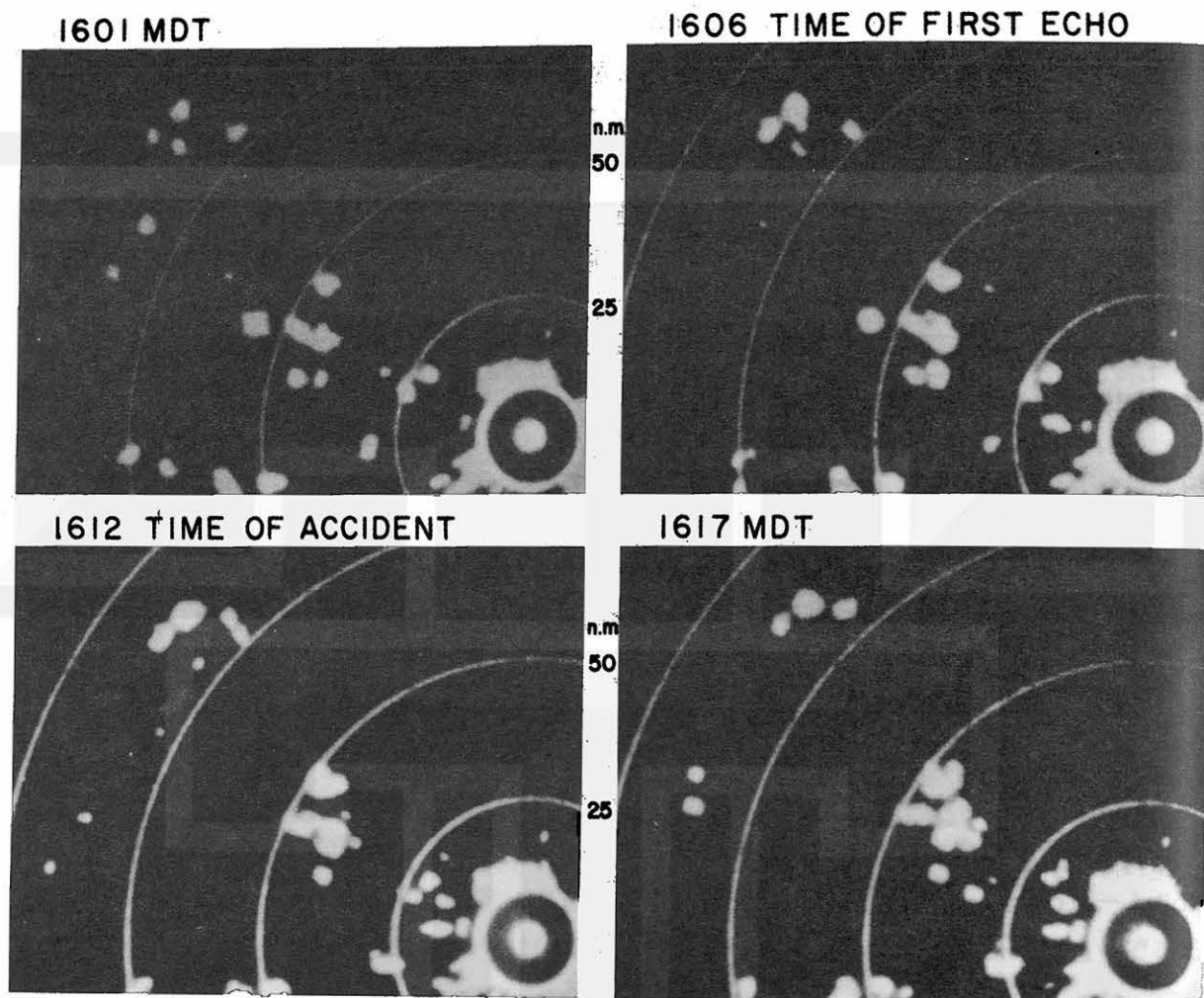
表 3.1 によるとピッチ10度における揚力減少は1ノットにつき2.5 パーセントである。これは、下降流によって150フィートの高度で、揚力が最大15パーセント減少したことになる。このケースでIAS が42ノット減少したことは重大であった。なぜならば、それにより揚力が55パーセントも減少することがあるからである。

このような強力なウィンド・シアーに向かって飛行するか否かを、離陸前にどうしたら判断できるだろうか？ 明らかに、レーダーの利用がこの判断の鍵を握っている。国立気象サービスのライモン・レーダー(10センチメートル) が写した写真は、デンバー全域にわたって多数の小さなレーダー・エコーが散在していたことを示している。

コンチネンタル426 便のマイクロバースト雲の最初のエコーは、16時06分 MDT に写され、それは事故の5分前であった。そのエコーは、事故の1分後の16時12分に最大の大きさと強度に達した。その後、エコーは2個に分裂して弱まった。

この事実は非ドップラーレーダーを使ってマイクロバーストのエコーを識別することは、非常に困難であることを示している。〔図3.8〕





<図3.8> 1975年8月7日、コロラド州ライモンにある国立気象サービスのレーダーによって写された4枚の写真。コンチネンタル426 便の事故を誘発したマイクロバーストのエコーは赤色で示してある。事故の起きた時刻は16時11分18秒 MDT である。

パン・アメリカン航空759 便の事故 —— ルイジアナ州ニューオーリンズにて

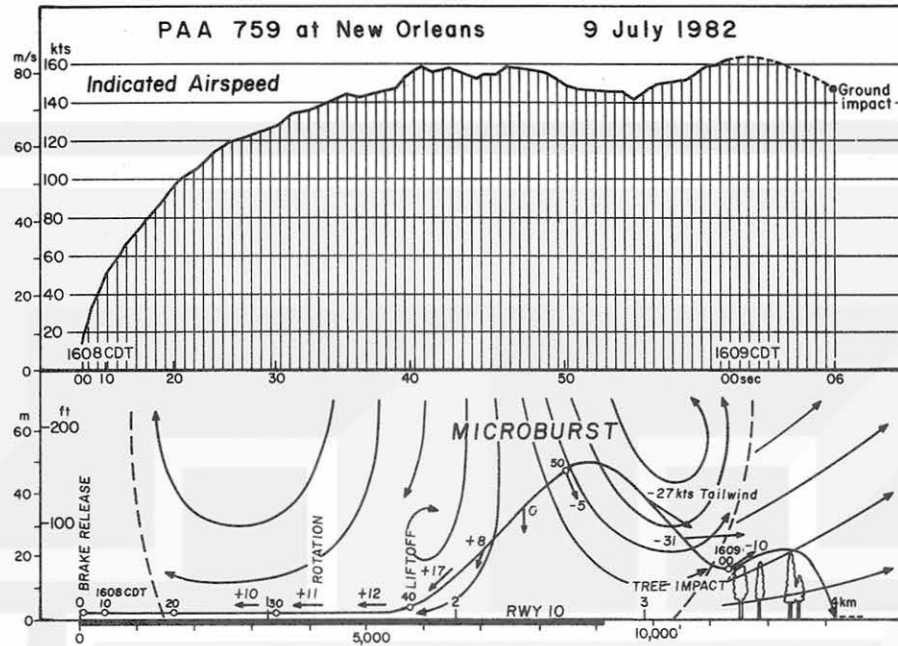
この事故は、1982年7月9日15時09分 CDT にルイジアナ州ニューオーリンズ国際空港にて、強雨の中を上昇中、発生した。降雨域内で、雷鳴を聞いたという報告はなかった。事故機は15時07分56秒に滑走を開始し、15時08分33秒に離陸の引き起こしをし、14ノット(7メートル/秒)の向かい風の中を15時08分39秒に離陸した。明らかな上昇率が確認され、“ギアアップ(脚上げ)”がコールされた。数秒後の15時08分44秒、パイロットは言った、“元に戻ってくれ、沈んでるよ、ダン” 15時08分51秒に最大高度に達した後、機は15時09分00秒まで沈下し続け、遂に地上52フィート(16メートル)でハックルベリー(こけもも)の木に衝突した。その後、機はわずかに上昇したが木と衝突した時の損傷により、墜落した。機は15時09分06秒に地面に激突し、炎上した。152人が死亡、9人が負傷した。死亡者のうち8人は、住宅街の地上にいた人であった。(図3.9、3.10、3.11)



＜図3.9＞ ルイジアナ州ケナーのニューオーリンズ国際空港の全体写真上に重ね合わせたパナナム 759 便の航跡。VRは引き起こしの地点、L/O は浮揚した地点を示している。赤丸印は機が最初に木に衝突した地点を示している。写真は藤田によって事故の一年後に撮影された。



＜図3.10＞ 空港東側の住宅地の望遠写真。黒い実線は航跡である。フェアウェイとハドソン通りの間に落下した後、機は点線に沿ってスキッドした。空地の部分は事故以前に家が建っていたところである。写真は事故の一年後、藤田によって撮影された。



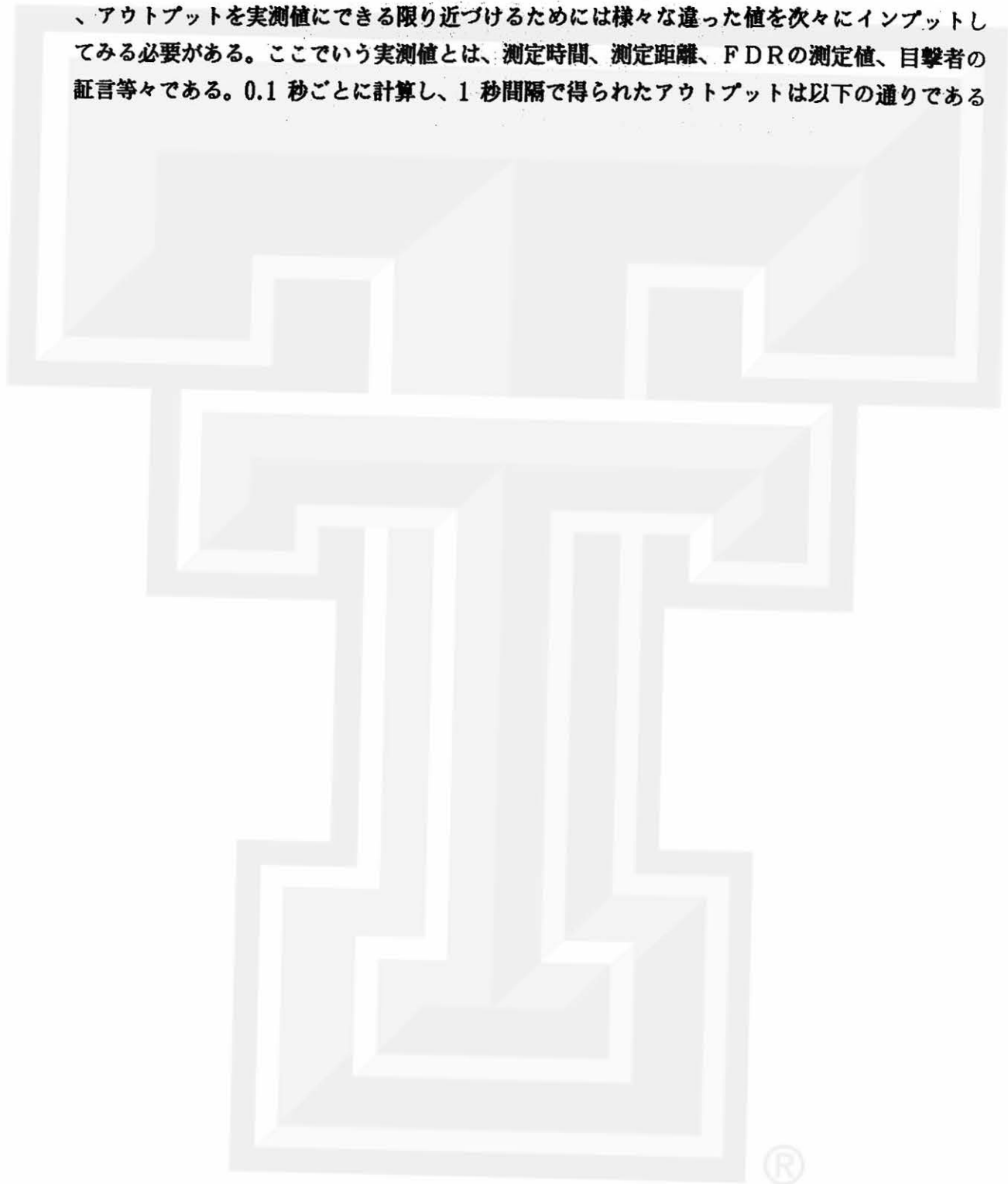
＜図 3.11＞ 1982年7月9日、ニューオーリンズ空港でのパンナム 759 便の航跡と対気速度。著者の再生によれば、機は最高163フィート(50メートル)AGLまで達した。その後、52 フィート(16メートル)まで降下しウィリアムズ通り東側の木に接触した。

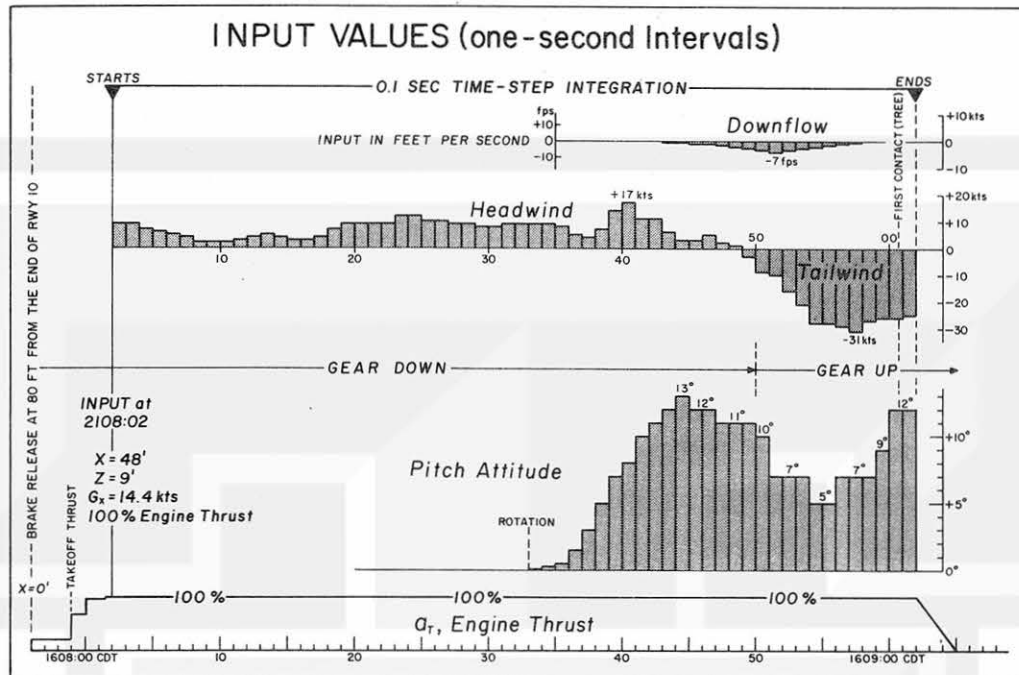
事故機が滑走路を加速し、フラップ15度、最大出力で浮揚したとの仮定の基に、下記の入力パラメーターを一秒間隔で指定した。

- u --- 周囲の風の追い風成分
- v --- 周囲の風の横風成分
- w --- 周囲の風の垂直成分
- θ --- 航空機のピッチ角

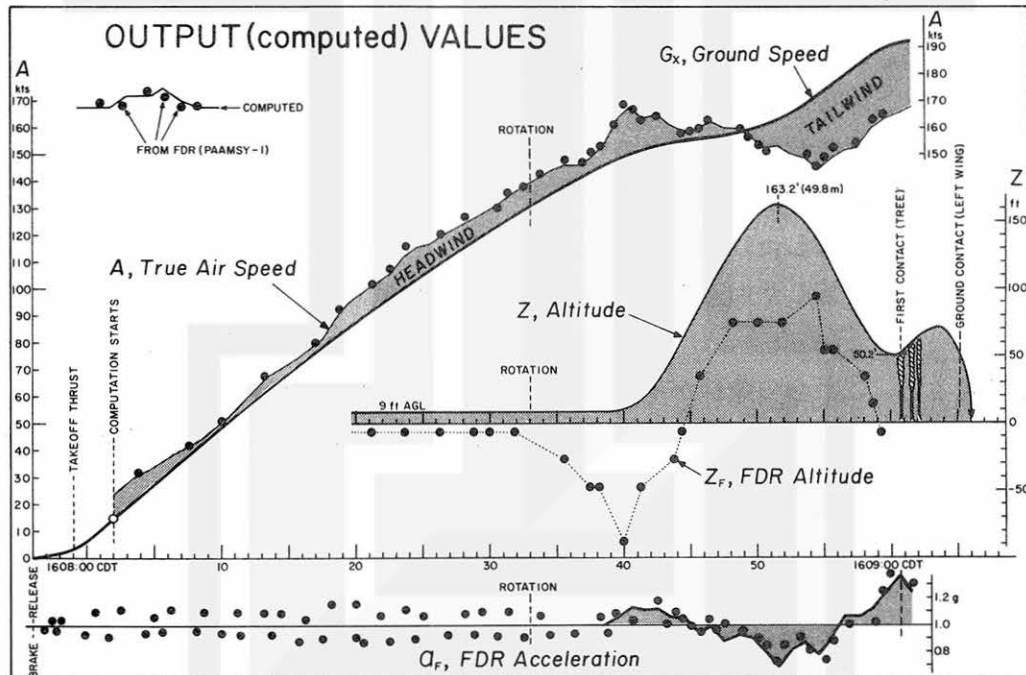
無風状態であったとすると、引き起こし後に正常のピッチを指定すれば、機は飛行距離の増加と共にその高度を徐々に増加して上昇してゆくことになる。

ある特定のウィンド・シアーの状態を u , v , w , とピッチ角の組合わせで指定してインプットすると、それは通常の上昇とはかなり異なったアウトプットを生じることになる。従って、アウトプットを実測値にできる限り近づけるためには様々な違った値を次々にインプットしてみる必要がある。ここでいう実測値とは、測定時間、測定距離、FDRの測定値、目撃者の証言等々である。0.1 秒ごとに計算し、1 秒間隔で得られたアウトプットは以下の通りである





<図 3.12> 1 秒間隔の時間的関数として指定したインプット値。それらは演算の度に改定された。



<図 3.13> 27回の演算の後得られたアウトプット値。計算値は実線で、FDR 値は点で示した。

X-----滑走路の中心線に沿って計測された距離

Y-----滑走路に直角な距離

Z-----航空機の滑走路上の高度

α_F ---航空機の垂直加速度

IAS ---航空機の指示対気速度

これらのうちXとYは調査班によって測定され、Z、 α_F 、IAS はパンナムの書類 PAAMSY-1 に基づく。

予想されたように、最初の演算のアウトプットは、事故機が実際に経験したものからはほど遠いものだった。演算を繰り返す度にインプットを改善した結果、アウトプットは徐々に実際のデーターに近づいて行った。最終的に27回目の演算によるアウトプットが、正確にPAA759便のフライト(滑走開始から最初に木に接触するまで)を再現した。

明らかにu、v、wにインプットする値は、勝手に指定する訳にはいかない。それらの値は連続の方程式を満足させなければならないし、ウィンド・シアアを引き起こす気象システム——もちろんマイクロバーストのことである——の気流にも合致させなければならない。27回の演算を通じて、以下の8つの条件がチェックされまた満足された。

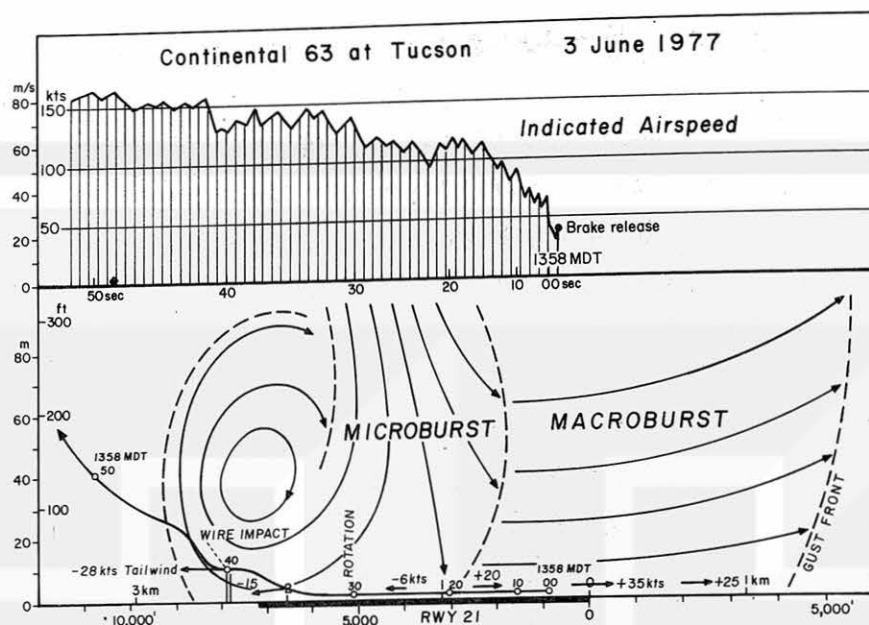
1. 連続性の方程式とマイクロバースト ウィンド・シアア
2. 滑走開始から最初に木に接触するまでの時間-----64秒
3. 滑走開始地点から木までの距離-----11,525フィート
4. 木の滑走路延長線上から直角に計った距離-----172フィート
5. 木と接触した地点の対地高度-----52フィート
6. 木と接触時の機の上昇率-----430フィート/分
7. 計算したIASとFDRのIASとの一致
8. 計算した加速度とFDRの加速度との一致

計算して見ると、これらの条件がインプットされるべき値の範囲をせばめていったことが明確となった。そしてこれらのインプット値により事故機の飛行パラメーターが再現できたのである。

コンチネンタル航空63便の事故 — アリゾナ州ツーソン

この事故は1977年6月3日13時58分40秒に起きた。航空機はB-727であり、13時57分34秒、滑走路21で20～30ノット(10～15メートル/秒)の向かい風に向かって滑走を開始した。空港周辺には積乱雲が無数にあり、最大49ノット(25メートル/秒)の南西からの突風を記録したガストフロントが数分前に空港を横切ったばかりだった。機が加速していくころには、ガストフロントの向かい風は弱まっていた。

機は13時58分20秒MDTにマイクロバーストに突入し、数秒間で20ノットも対気速度が減少した。13時58分28秒に引き起こしをした時には、風は追い風約10ノット(5メートル/秒)になっていた。浮揚後、対気速度は通常通り増加しなかった — なぜならば追い風が徐々に増加していったからだ。機は上昇することができず、空港の端を南北に走るノガレス・ハイウェイ沿いの高圧線との接触を回避することができなかった。



<図 3.14> 1977年6月3日13時58分 MDT、アリゾナ州ツーソンにおけるコンチネンタル63便の航跡。機はノガレス・ハイウェイの高圧線に接触した。

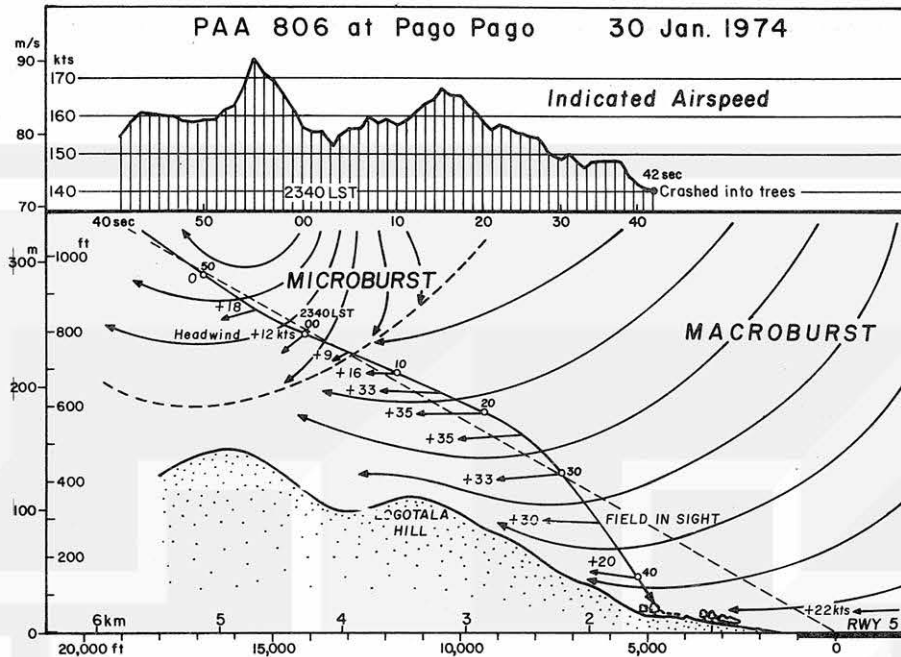
ノガレス・ハイウェイを南下中の車のドライバーの証言によると、機は200 フィート (60 メートル) 以下の高度でハイウェイの上空を横切ったとのことだ。左右の主車輪はまずハイウェイの空港側の高圧線に接触した。次に胴体がハイウェイの反対側の高圧線と接触、切断し、高圧線の塔を一本なぎ倒した。これによりハイウェイの上下方向1/8 マイル (200 メートル) にわたって高圧線が地面まで垂れ下がった。その後、機は上昇を続けた。

これをマイクロバーストに起因するウィンド・シアーに照らしてみると、機は水平軸をもつ渦のロールの下部を飛行中、28ノットの追い風に遭遇したことになる。(図 3.14)

明らかにそのマイクロバーストの南西側の縁は高圧線接触地点のわずかに南西寄りにあったので、機は接触の数秒後に安全に上昇することができた。その後、機は空港に戻り、けが人はなかった。

3.4 ファイナル・アプローチ最終進入中の事故

ファイナル・アプローチ中の事故は、航空機が滑走路の進入端付近のグライドスロープ上に位置する強力なマイクロバーストを突き抜けて、着陸を試みた時に起こる。ほとんどすべての例において、航空機は降雨またはバーガに接近するとき、まず向かい風の増加に遭遇する。



<図 3.15> 米領サモア、パゴパゴ空港の滑走路 5 にアプローチ中、23時40分42秒 LST に熱帯林に墜落したパンアメリカン806便の航跡。

その結果、機の高度は増加する。パイロットが機をグライドスロープに乗せるべく高度を下げた時、そこに待ち受けているものは、下降流と追い風である。早期に高度を回復すべくフル・パワーを出さない限り、機は地面まで沈下を続ける可能性がある。

パン・アメリカン航空 806 便の事故 — 米領サモア、パゴパゴ

この事故は1974年 1月30日の真夜中の10分前、滑走路 5 にアプローチ中に起こった。機は、滑走路の3,865 フィート(1,178メートル) 手前の林に墜落した。101人の搭乗者のうち94人が死亡、生存者はわずか5人だった。

滑走路900 フィート(270メートル) まで降下した時、IAS は5秒間で158 から175 ノットまで増加し、続いて10秒以内に23ノットも急減した。このIAS の急激な減少は、地表に向かって降下しつつある空中のマイクロバーストのなかを機が通過したことを意味している。その後、機は徐々にIAS を増しつつ23時40分16秒LSTには167ノットまで回復した。さらに後、IASは継続的に減少し、ついに機は23時42分00秒LST に熱帯林に墜落した。墜落時の IAS は140ノットであった。(図3.15)

パゴパゴ空港では事故の2分前の23時39分 LST に、040° /22ノットの地表風が吹き、強い雨が降っていた。事故の4分後の23時45分には風は少し変わり020° /13ノット、瞬間最大風速35ノットとなった。激しい雨はまだ続いていた。

しかしながら、事故機は強雨には遭遇しなかった。サードオフィサーの証言によると機は雨に遭遇こそしたが、決して強雨ではなかったとのことである。他の生存者の証言でも墜落直前雨はほとんど認められず地上のあたりが見えたとのことだった。

図3.15に示した著者の解析によると空港の上空にはマクロバーストがあり、滑走路 5 のアプローチエンドの南西4 キロメートル(2.5マイル) には空中のマикроバーストが存在したことを示している。我々は、マイクロバーストやマクロバーストの中心には強雨があると考えべきである。この点からすると、事故現場における降雨の程度は比較的弱かったことになる。マイクロバースト渦のロールの下部では、IAS の急激な増加が起こると予想できる。マイクロバーストの吹き出し部分に突入するとこの“増加”は“減少”に変わる。であるから事故機はマクロバーストの向かい風部分に突入したと考えられる。機が降下するにつれて、滑走路 5 手前のログタラ山にさえぎられた影響もあって向かい風が減少したのであろう。

この事故の複雑さのため、ALPA(操縦士協会)はこの事故の原因について再調査するよう安全委員会に陳情書を提出した。この陳情書を受けて、安全委員会は事故調査を再開した。再調査の結果、この事故の最も考え得る原因はパイロットが過度の降下率をタイムリーに気づかず、修正しなかったことにあると結論された。

ニューヨーク、JFK 空港でのイースタン航空902便のインシデント及び66便の事故。

このインシデントと事故は1975年6月24日、ほんの7~8分の間にて続けに起こった。2機ともニューヨーク州ニューヨーク市の JFK 空港の滑走路 22L に着陸しようとしていた。先行機であったイースタン902 便は15時58分 EDT に進入復行を行ったが、イースタン66便は滑走路末端手前2,400フィート(730メートル)の所で16時05分 EDT に進入灯に激突した。搭乗者124人中112人が死亡し、残り12人が負傷した。

この2機が非常に強いウィンド・シアーに遭遇したにもかかわらず、別の2機はそれぞれ16時00分(EA902便の2分後)と16時02分(EA66便の3分前)に着陸した。その時のIASの低下は、ほんの20~25ノット(10 ~ 13メートル/秒)であった。EA902便とEA66便が遭遇した2つのウィンド・シアーの間には、明らかに切れ目があった。JFK 空港で起こった不思議なウィンド・シアーの性質をつかむため、著者は15時44分から16時10分 EDT の間に滑走路 22L に着陸しようとした14機のパイロット報告書を入手した。以下にその要約を述べる。

アメリカン678便(B747型機) : アウター・マーカー(無線標識)付近で中程度の強さの雨に遭遇。1,000 フィートで雨は弱まった。最終進入時にウィンド・シアーに遭遇。進入速度維持のため、かなりの推力を用いたが、管制塔に報告するほどのウィンド・シアーではないとパイロットは判断した。

アメリカン187便(B707型機) : 最終進入までずっとスムーズであった。500フィートを過ぎて、はじめてウィンド・シアー又は下降流の徴候が出はじめた。これ以降、パイロットは計器着陸装置のグライドスロープに乗り、速度の低下を防ぐため推力を増した。滑走路22L のすぐ手前、機の右前方約1マイルの所に雷雲を視認。滑走路末端には雷雲からの雨が降っていた。

アリゲニ858便(DC9型機) : 滑走路22L 末端から約1 マイル手前の所で下降流に遭遇。降雨の中で着陸。

TWA 843便(B707型機) : アウター・マーカーとミドル・マーカーの間で中程度の強さの雨に遭遇。進入及び着陸は正常。地上滑走終了地点の滑走路は乾いていた。

SAS 911便(B747型機) : 1,000フィートで激しい雨に遭遇。進入の初期の段階でウィンド・シアー経験。接地の間際はほとんど雨は降っていなかった。

KLM 641便(B747型機) : 約1,200フィートで降雨に遭遇。弱い雨が激しい雨に変化した。慣性航法装置(INS)によると、向かい風15ノットであった。300フィートで対気速度が低下したため、推力の増加が必要であった。INSによると、100フィートで向かい風は10ノットであった。滑走路末端上空を通過中に雨は止んだ。左へ2度偏流修正角を取って着陸。滑走路の間までは表面は雨に濡れていたものの、それ以降は乾いていた。

PAA 133便(B707型機) : 約800フィートでかなり激しい雨に遭遇。200フィートで横風成分は右から18ノットであった。非常に激しい雨の中では、窓のワイパーを高速位置で用いた。激しい雨の中で偏流修正角を取らずに接地。1,000フィートほどの地上滑走をした所で、太陽が降り注ぐ乾いた滑走路に出た。誘導路上でパイロットは、フライング・タイガー機が四苦八苦して降下してくるのを目撃。パイロットの証言、「機を守るために、パイロットはまるで熱く焼けたトタン屋根の上でもがいている猫のように思われた」。

フライング・タイガー (DC8型機) : 700フィートから200フィートまで強烈で、持続性のある下降流に遭遇。パイロットは通常よりかなり多めの推力を異常に長い間使用。200フィートから接地までは下降流は中程度の強さにあったが、右からの横風は非常に強かった。地表付近で、50～55ノット吹いていた。そして、突然、この風は地上では無くなってしまった。計器着陸装置を使って進入している間、ずっと右に10度～15度機首をふらなければならなかった。接地の瞬間、偏流修正角は不要であった。

イースタン902便(L1011型機) : 気流は安定し、降雨もなかった。400 フィートまではすべて正常。機はかなり激しい雨に突っ込むと同時に、視程はゼロとなり、機は沈下しながら右へ流されはじめた。次に対気速度が144 ノットから120 ノットまで落ちた。推力を増して引き起こしを行い、進入復行を開始した。かなりの推力を用いると同時に異常に高いピッチ角まで機首を上げて、はじめて沈下を止めることができたが、この時にはもう機が地上60フィートの所まで沈んでいた。着陸復行のあと、機はニュージャージー州ニューアーク空港に着陸した。

フィンエア105便(DC8型機) : 雨は滑走路手前6マイルから3マイルにかけて最も強かった。INS によると1,500フィートでの風は230度の方向から30ノットであった。滑走路手前約 2マイルで、対気速度が25ノット落ちた。その後の進入及び着陸は正常であった。

N-240(ビーチクラフト) : アウターマーカーの少し手前から、アウターマーカーとミドルマーカーの間までの間で、弱い乱流と中程度の強さのない激しい雨に遭遇。その後の進入は正常であったが、約200フィートないし300フィートで強い沈下率を経験。対気速度は約20ノット低下。沈下を止めるために推力を増し、その後の進入は正常であった。

イースタン66便(B727型機) : 700フィートで雨に突っ込んだ。500フィートで雨はひどくなった。400フィートで機は沈下しはじめ、7 秒間で対気速度は138ノットから122ノットまで低下した。140フィートで滑走路を視認。16時05分12秒EDT に滑走路の末端の手前2,400フィートの所で進入灯に激突。

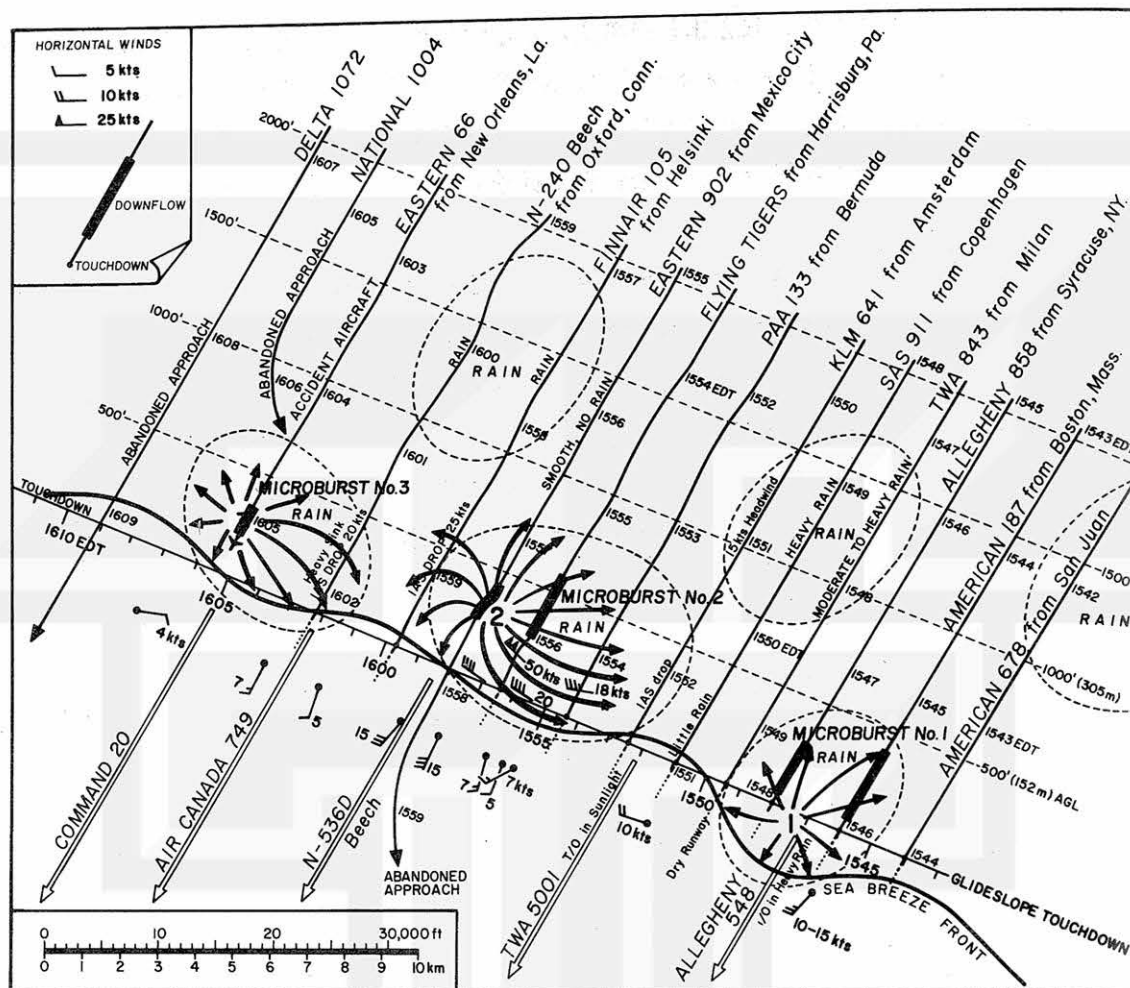
ナショナル1004便(B727 型機) : 計器進入方式で先行機の後を飛行していた。16時05分30秒EDTに着陸復行を行うよう指示された。

デルタ1072便(L1011型機) : ナショナル1004便の後を飛行していた。事故のあと空港は閉鎖された。滑走路方位角で直線飛行を行った。

図3.16は、上述した14機が遭遇した気象現象をわかりやすく図示するためにつくった航跡対時間座標である。この図を注意深く調べた結果、最終進入中の航空機を危険な状態に陥れる低高度のウィンド・シアの本質について、重要なことが発見された。

まず最初にわかったことは、吹き出し風の広がりに限られていて、その水平規模は、10～100キロメートルを中心に広がる“メソスケール”に比べて明らかに小さい。次にわかったことは、吹き出し風が低高度に存在し、丁度地表付近のジェットのように流れているということである。フライング・タイガー機が接地寸前、地表付近で経験したものはこれである。

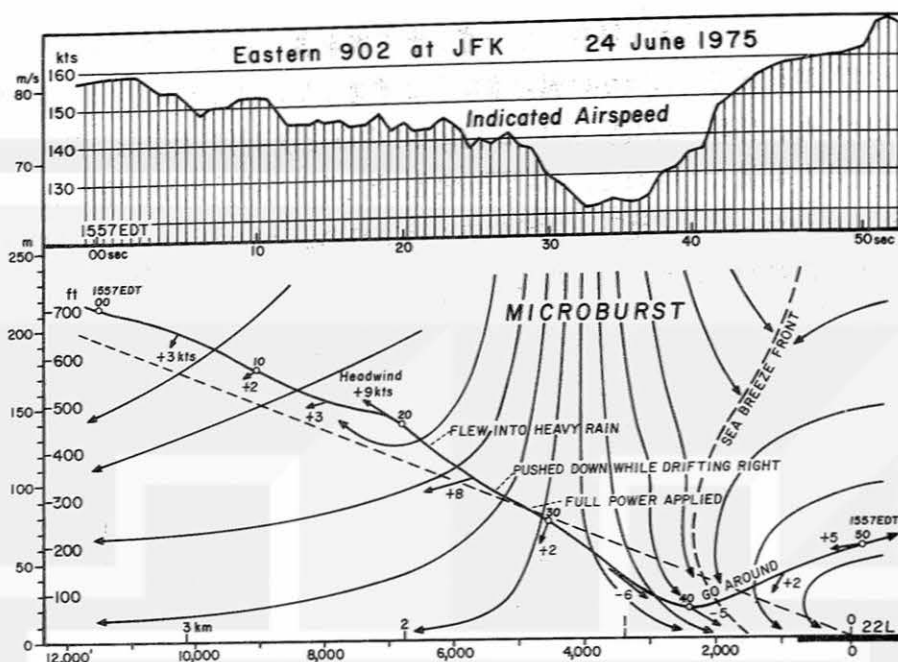
第1章で述べたスターバーストの被害の事実と、前述の発見に基づいて、著者は1976年3月に“ダウンバースト”の概念的なモデルを作った。今では4キロメートルの大きさを境にして、ダウンバーストをマイクロバーストとマクロバーストに分類している。この調査の対象となったウィンド・シアアを誘発したストームは、3つのマイクロバーストであることがわかった。イースタン66便は3番目のマイクロバーストの中心に突入した後、墜落した。イースタン902便は2番目のマイクロバーストの下降流域の西端付近を通過した。



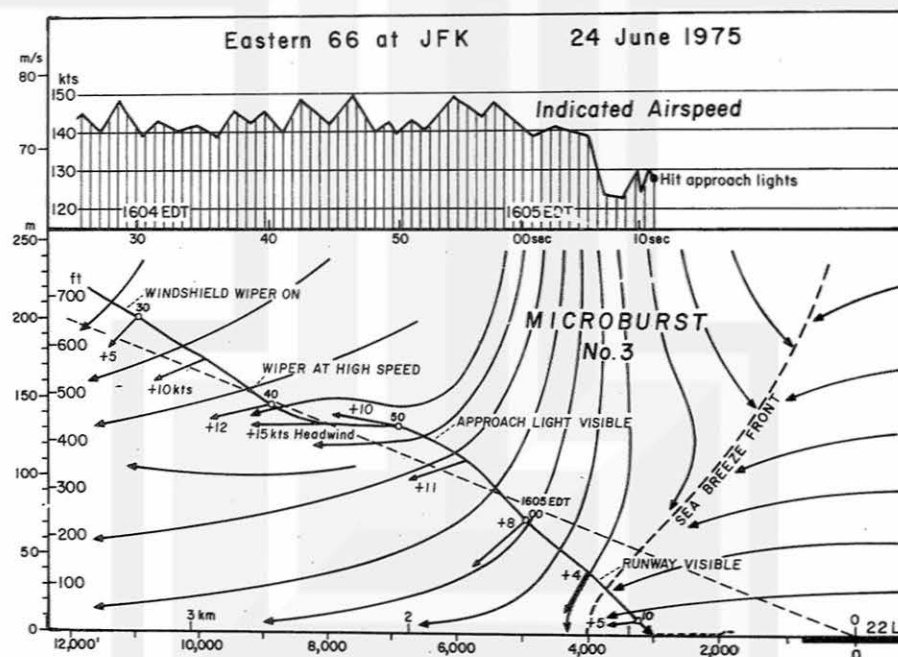
<図3.16> 1975 年 6月24日JFK 空港で起こった気象現象を表すための航跡対時間座標。進入方向は滑走路22L に平行に描かれている。14機のパイロットに通報された空港の風は、滑走路22L の風力計のある位置に記入されている。海風前線が、マイクロバーストの風を滑走路に吹き込むことを阻んでいた。

1 番目のマイクロバーストの中心は滑走路 22L の北端にあったので、航空機の離着陸への影響はなかった。

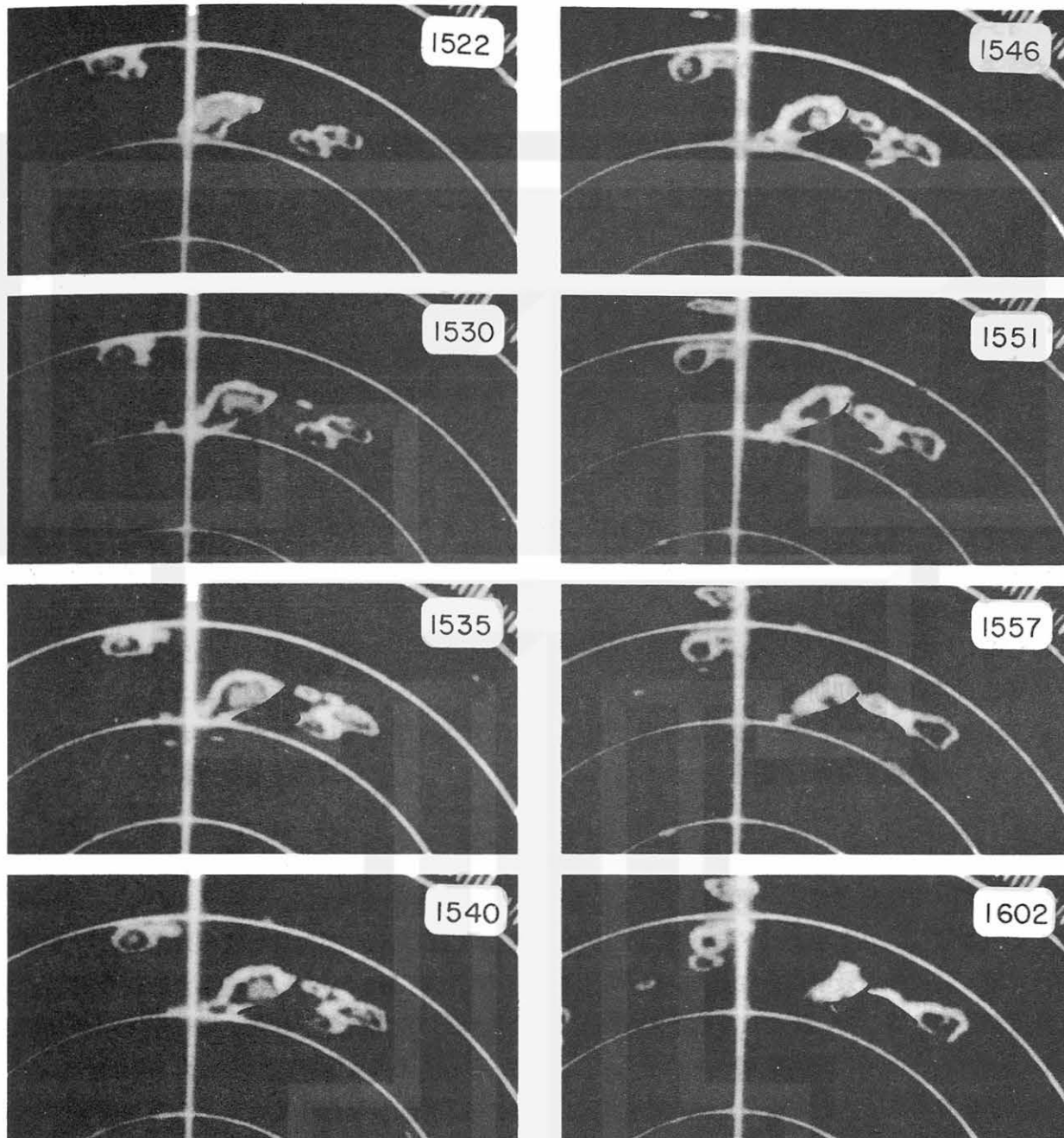
図3.17はイースタン902便が経験した一連の出来事を表している。約500 フィート(150メートル) AGL で”降雨前面での向かい風の増加”に遭遇した。次に下降流の流速の増加と共に、向かい風が減少した。15時57分31秒 EDT に下降流の中心を通り抜けたあと、追い風が増加したため、着陸復行を余儀なくされた。15時57分28秒最大推力を出したが、機が上昇を開始するまでに10秒ほどかかった。「沈下と同時に右へ流された」というパイロットの証言によれば、機は下降流の中心の右側にいたことになる。



<図3.17> 1975年6月24日、JFK 空港でのイースタン902 便の航跡。機は二番目のマイクロバーストに突入し、60フィートAGL まで沈下した後上昇した。このインシデントはイースタン66便事故の7分前におこった。



<図3.18> 1975年6月24日16時05分 EDT、JFK 空港でのイースタン66便の航跡。機は3 番目のマイクロバーストから抜け出せずに、進入灯に激突した。



＜図3.19＞ 1975年6月24日、JFK 空港滑走路 22L の末端付近で、3つのマイクロバーストを発生させたスピアーヘッド（やり先）の形をしたレーダーエコー（赤色）。写真中の3つの同心円は、ニュージャージー州アトランティック市の国立気象サービスのレーダーからの、それぞれ50、75、100マイル（海里）の距離を示している。

イースタン 66 便も ” 降雨の前面の向かい風の増加 ” を経験したが、それは強いものであった。そのため、機の高度がかなり上がった。機が降下してグライド・スロープに戻った時、向かい風が急激に減少し、下降流が増したため、機は急降下した。強い下降流の中で向かい風が急速に減少したため、機は再び高度を回復することができなかった。(図 3.18)

アトランティック市のレーダーによって撮影された J F K 空港の雷雨は、いくつかのセルから成っていた。しかしながら、どれもスーパーセルと呼べるほど大きくも強くもなかった。15 時 22 分 EDT にハドソン川西岸の中程度の大きさのエコーから、小さな突起状のエコー (淡赤色) が突き出しはじめた。15 時 30 分 EDT、赤いエコーの先端がマンハッタン南部に到達した。その後赤いエコーは急速に東南東に向かって成長し、15 時 51 分 EDT には J F K 空港に達した。(図 3.19)

15 時 48 分に 1 番目のマイクロバーストはこの赤いエコーの先端の下にあった。16 時 02 分までには、赤いエコーがロングアイランド西部をおおい、南岸沿いに第 2、第 3 のマイクロバーストを発生させた。こんなに小さなエコーから次々とマイクロバーストが下りてくるといのは、信じ難いことである。しかしながら他のエコーと異なり、この赤いエコーは弓矢のように急速に突出していた。初期の論文では、著者はこのエコーのことを ” やり先型のエコー ” と呼んでいた。しかしながら、どのような機構でやり先型のエコーが発達し、また、それからマイクロバーストが発生するかは未だにわからない。

ヨルダン王立航空 600 便の事故 — カタール国ドーハ

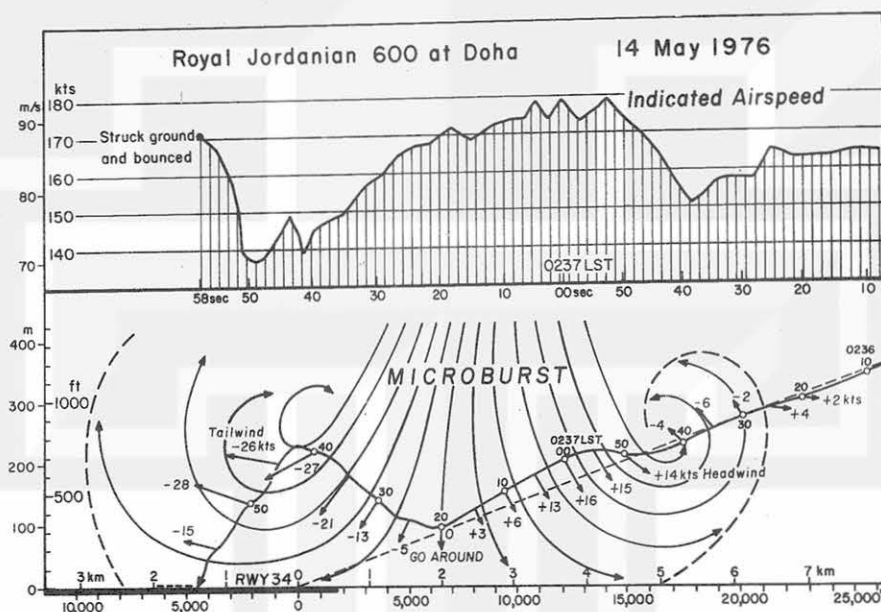
この事故は、カタール国ドーハ空港で 1976 年 5 月 14 日 02 時 38 分 LST に航空機が着陸復行を行おうとしている最中に発生した。機が 750 フィート (230 メートル) AGL に達したところで、高度が下がりはじめ、そのまま 10° のピッチ角で滑走路の左端に激突した。機は一度バウンドし、800 メートル (2600 フィート) 滑って、尾部から消防署の車庫にぶつかった。胴体は 3 つに分断された。4 人が難をのがれたものの、死亡者 45 人、負傷者 15 人という結果になった。

アンマンからドーハへ向かう飛行の前半は順調であった。機がドーハに近づいたところで、雷雨に遭遇した。ドーハ空港には160°と340°の方向の滑走路が一本あるだけである。02時08分 LST、パイロットは南向きに着陸を行おうとした。滑走路16を要求した後、目視進入が認められた。機が滑走路16に向かって降下を開始した時、90°の方向から17ノットであった風が840°の方向から6ノットに変化した。この時点では、パイロットは滑走路を視認できなかった。進入復行を行い、滑走路34への進入を要求した。

機が旋回を終えて空港を視認した02時35分 LST、着陸許可が与えられた。しかしながら、滑走路上の風は再び180°の方向から6ノットへと変化した。これは滑走路34にとっては追い風となる。雨がかなりひどくなり、管制塔の視程は1000メートル(0.6マイル)未満となった。

02時37分19秒 LST、まだ着陸決定高度に達しないうちに、約300 フィート(90 メートル)AGLで2回目の進入復行が行われた。その時パイロットは、ダラン空港へ行く許可を要求した。

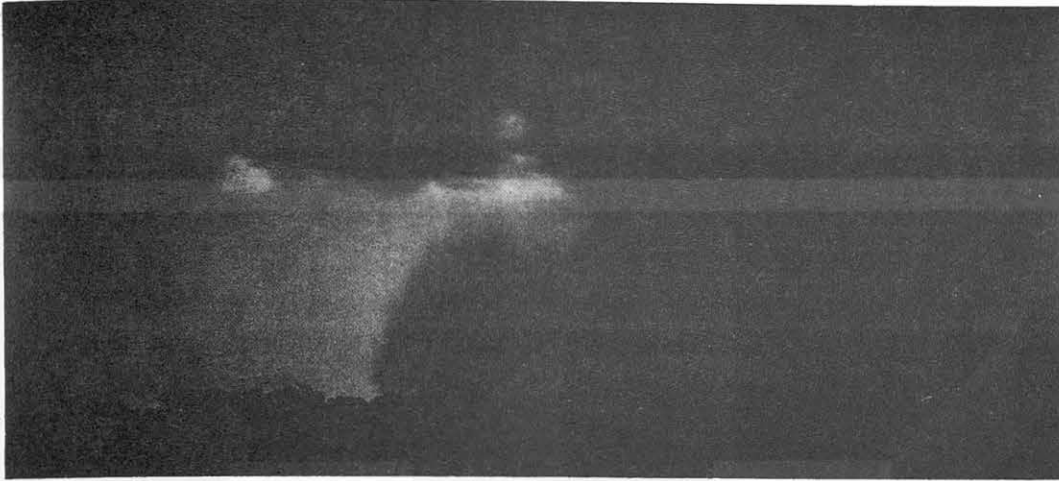
機は12° のピッチ角で、1,300 フィート/秒(6.6メートル/秒)の上昇率を保って上昇をはじめた。この上昇中、対気速度は140ノットまで減少しつづけた。750フィート(230メートル)AGL に達したところで、機は降下しはじめ、ついには4,200 フィート/秒(21メートル/秒)の降下率で地面に激突した。墜落前7秒間は、対気速度が急激に170 ノットまで増加し、対地接近警報装置(GPWS)は墜落まで11秒間鳴り続けていた。



<図3.20> 1976年 5月14日02時38分 LST、カタール、ドーハ空港で墜落したヨルダン王立航空600 便の航跡。著者は、航空機が強烈なマイクロバーストの水平渦の中で、強い追い風を受けたものと解析した。

著者が解析した図3.20は、機の対気速度が151 ノットから179 ノットに急増したとき、向かい風が28ノット増していることを示している。おそらく機は水平渦の下を通過したのだろう。02時37分19秒に2回目の着陸復行が試みられたとき、機は下降流のまただ中にいたが、やがてマイクロバーストの追い風領域に進入することになるとは知る由もなかった。機がマイクロバーストから脱出中、対気速度が減少し、もはや高度を維持できなくなった。最高高度に達した直後、どんどん高度が下がりはじめ、ついには02時37分58秒 LST に地面に衝突した。

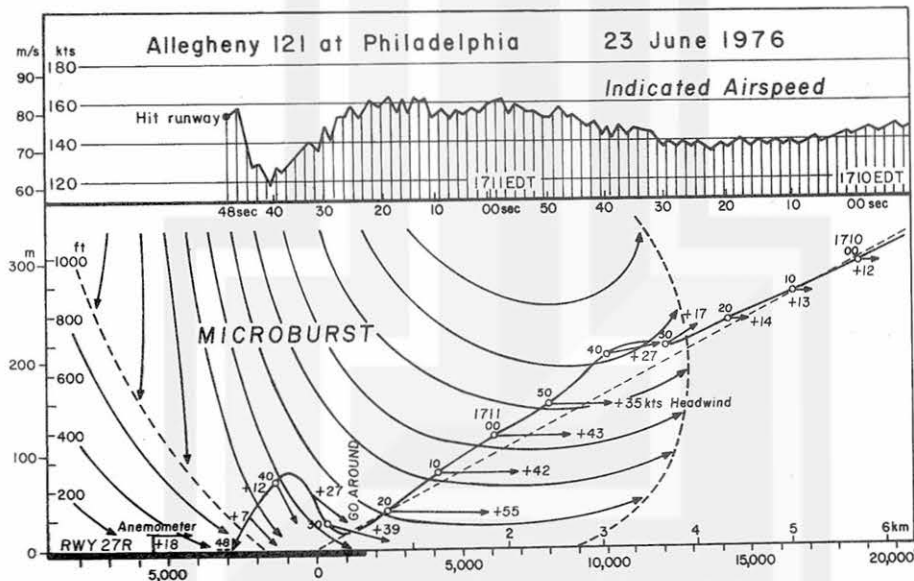
ウェット・マイクロバーストの水平渦を視覚化するために、図1.5 右側中段の写真を拡大した。この写真はマイクロバースト前縁に位置する水平渦の恐ろしい姿を明白に写し出している。この例では、ウェット・マイクロバーストから吹き飛ばされた雨滴によって、渦がよく見えている。(図3.21)



<図3.21> 1978年7月1日カンサス州ウィチタに発生したマイクロバーストの水平渦の地上からの写真。この写真は図1.5 中のマイク・スミス氏が撮影した写真のうちの1枚を拡大したものである。

ペンシルバニア州フィラデルフィアでのアリゲニー航空121便の事故

この事故は1976年6月23日17時11分48秒 EDT、航空機がフィラデルフィア空港滑走路27R に着陸しようとした際に発生した。機は17時10分30秒に通常の” 降雨前の向かい風の



<図3.22> 1976年6月23日17時00分48秒 EDTにフィラデルフィア空港で地面に衝突したアリゲニー121 便の航跡。

増加”に遭遇した。機のグライドスロープ上の高度が増加したが、続く50秒のうち決められた高度まで下降した。機の高度が下がるにつれて、向かい風が増加し、50ノットを越えるほどになった。50ノットの向かい風の中を160ノットの対気速度で飛行していたので、対地速度はわずか110ノットであった。対地速度が正常な着陸を行うには少なすぎるので、17時11分28秒 EDT に着陸復行が開始された。250フィート（80メートル）AGL まで上昇している間に、対気速度は120ノットまで減少した。このあと、機は高度を失いはじめ、滑走路の中心から350フィート（100メートル）右方で地面に激突した。106人中86人が負傷し、20人は難を免れた。（図 3.22）

第4章

NIMRODと

JAWS観測網

NIMROD 1978 と JAWS 1982 は、マイクロバーストに重点を置いた米国におけるふたつのダウンバースト観測計画である。これらの観測計画の略称は、実験の段階で国立大気研究所 (NCAR) がつくったものである。

NIMROD 北部イリノイ州におけるダウンバーストの気象学的研究 (Northern Illinois Meteorological Research On Downbursts) は、当時疑義のあった風系を探索する最初の研究計画を表すのに最適の略称である。聖書の中の Nimrod とは、カッシュの息子である最強の狩人である。

JAWS 合同空港気象研究 (Joint Airport Weather Study) は、コロラド州デンバーのステープルトン空港で離着陸するジェット機を危険な状態に陥れる、強い風のシアーを象徴した人喰いざめを暗示している。

4.1 NIMROD 観測網

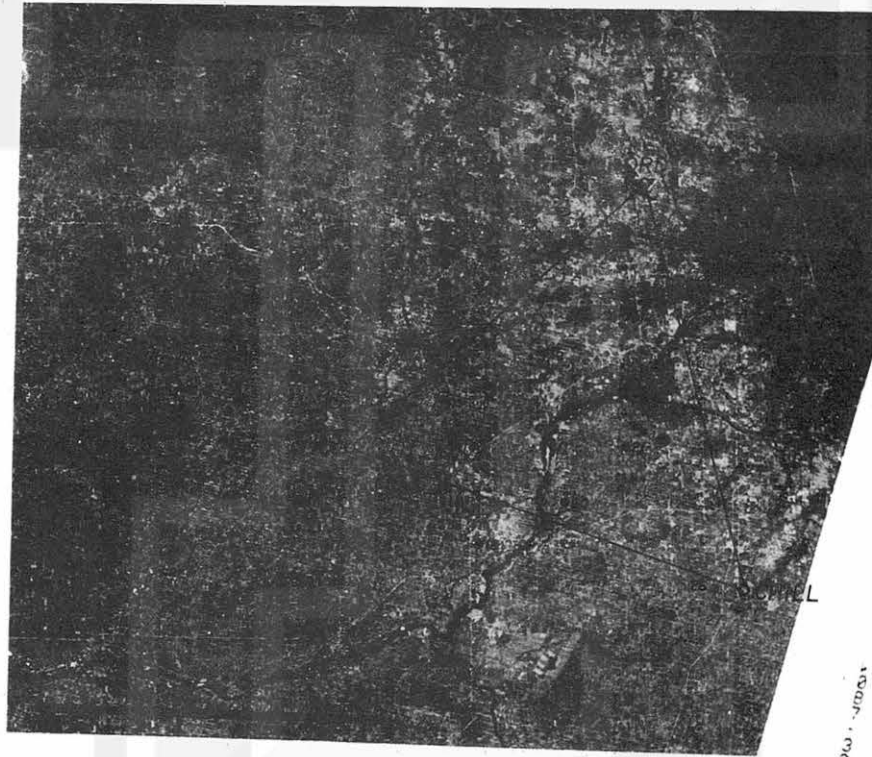
NIMROD 計画を実現させるための一連の出来事は、急速にかつ連続的に発生した。言うまでもなく、1975年6月24日 JFK 空港で起きたイースタン航空66便の事故は、観測の必要性を痛感させる引き金となった。この悲惨な事故のあと、気象界や航空界の要望に答えて著者は、「ニューヨーク・ジョン・F.ケネディー空港の進入経路末端のやり先型エコーとダウンバースト」と題する SMPR 研究論文137を1976年3月に2,000部出版した。この論文に対する需要が多かったので、1976年9月第2版を出版する運びとなった。

1977年2月の Monthly Weather Review (月間気象展望) 誌に、藤田とバイヤーによる「航空機の墜落時に存在したやり先型エコーとダウンバースト」という論文が正式に出版される前の1977年1月、NIMROD 計画の構想はほぼ終了していた。観測の費用は、ほとんどが米国科学財団から出たが、1977年暮れに承認され、1978年初めからレーダーと PAM の設置場所の選定が開始された。藤田とラメッシュ・スリバスタバ(共にシカゴ大学) は、この実験の共同研究者として参加した。

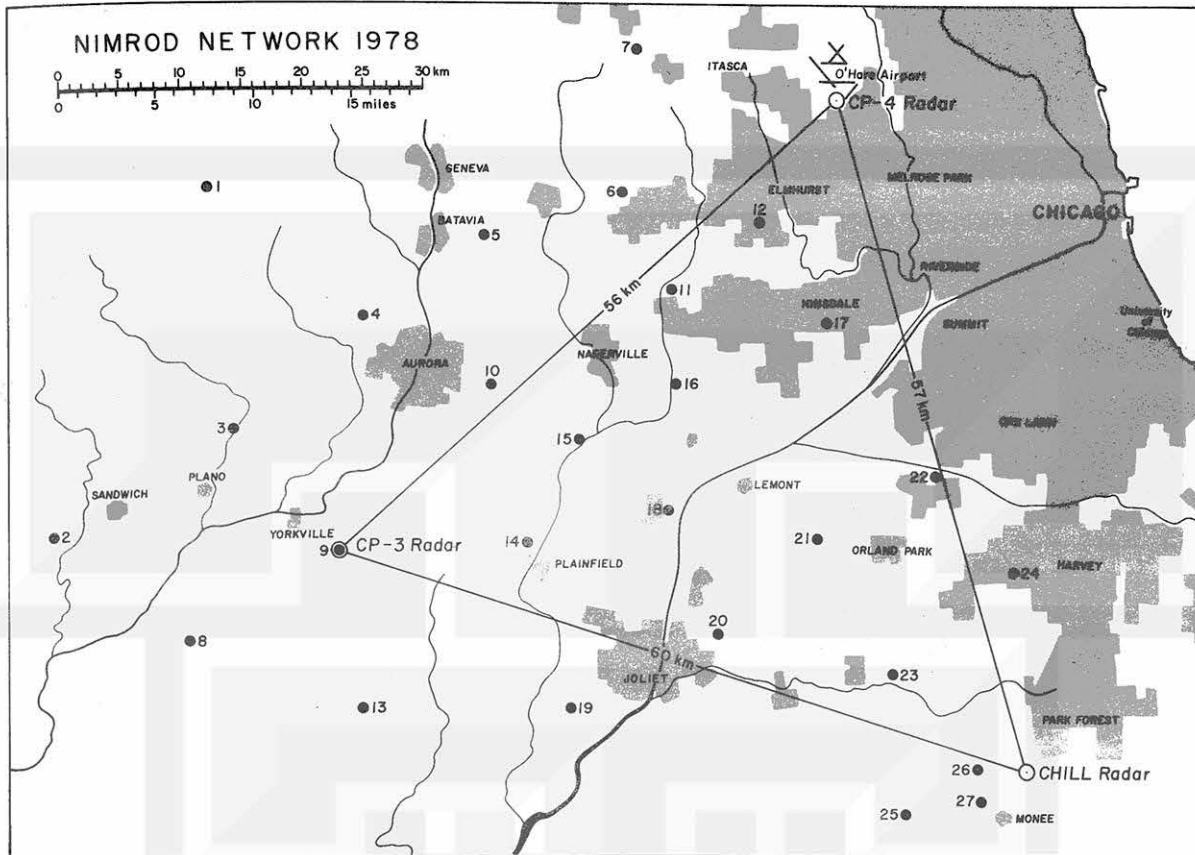
レーダーと PAM は障害物がなく、しかもシカゴ・オヘア空港からそう遠くない場所に置かなければならないため、NIMROD 観測網を作るために NASA のランドサットの写真(図4.1)を多様な目的に用いた。写真には、シカゴ市の周辺の数々の保護林(茶色)が写っている。しかしながら市街地と保護林の西方には広大なとうもろこし畑(暗い緑色)がある。

3基のドップラーレーダーを配置し、一辺約 60km の三角形を作るために、ヨークビルに CP-3 と指令部を置いた。CP-4 はオヘア空港、CHILL レーダーはモニーに置いた。西部郊外にドップラー三角形と PAM 網がはりめぐらされたあと、1978年 5月19日からデータの収集が開始された。(図4.2)

観測中に撮影されたいくつかの写真を、図4.3～図4.5に示した。ヨークビルの司令部は、小さな人工池の堤防に置かれた。ドップラーレーダーからの見晴らしは特に南東から南西に向かって良好であった。PAM のデーターは、図中の高いアンテナによって受信された。データーは計画の研究者の要求によって、即座に地図や時間曲線の形で表現された。(図4.1)



<図4.1> シカゴ周辺を写したランドサットの写真にNIMRODの観測網を重ねたもの。

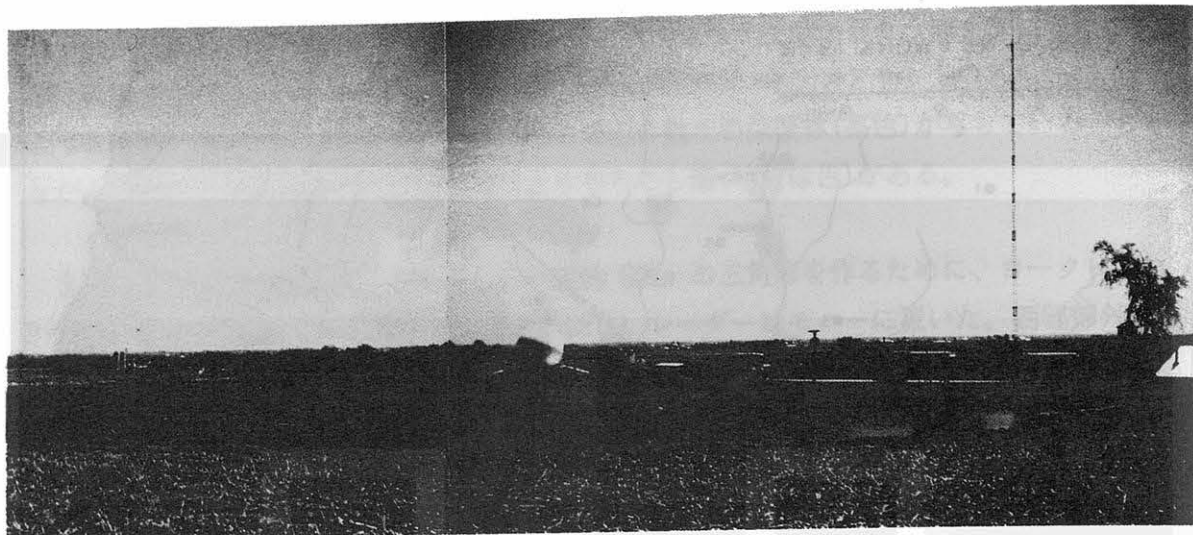


<図 4.2> イリノイ州シカゴ市の西部郊外に張りめぐらされたドップラー三角形と、27個の PAM。この観測網は、1978年5月19日から7月1日までの42日間運用された。

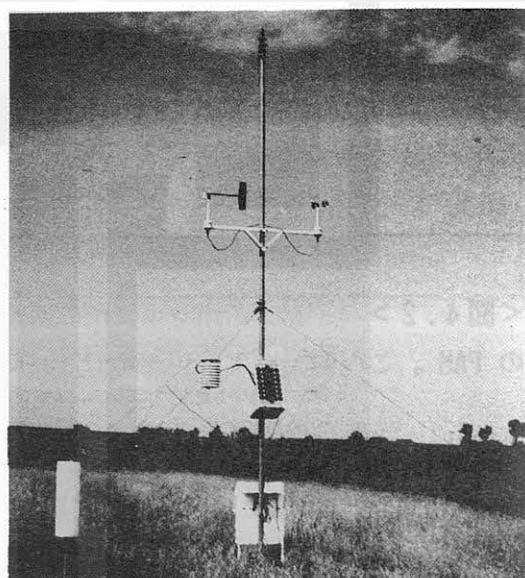
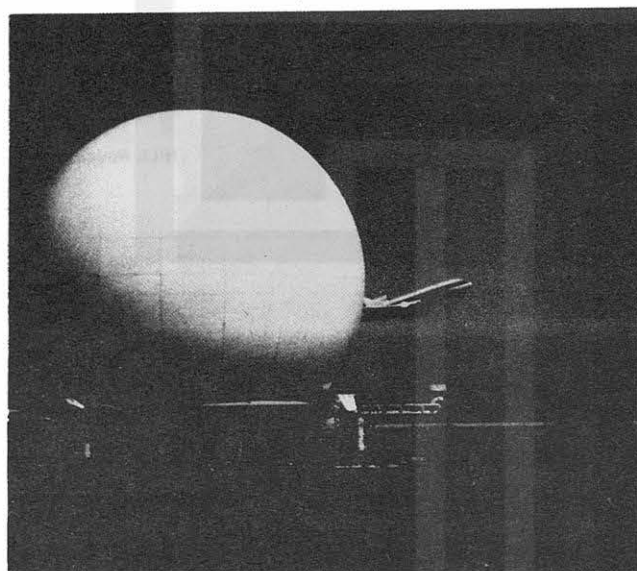
2台の GMD-I は、レーウインゾンデからの信号を受けるために用いられた。バルーンは1～2 時間間隔で、時には30～45分間隔で上げられた。費用がかさむため、全天候型放出所は設置されなかった。しかしながら、熱心な学生やスタッフのおかげで、降水時や強風時にもバルーンへのヘリウムの注入や、それらの放出に最善がつくされた。

観測の4分の1の期間が過ぎた頃、マイクロバーストは必ずしも強い雷雨の中で起こるものではないことがわかった。あるものは雷のない比較的弱いエコーから発生した。観測の全期間を通じて、上層風や温度の時間断面を作ってみると、マイクロバーストと上層風や温度の偏差などで表現される気象環境との関連は薄いこともわかった。

この問題は、マクロバーストやマイクロバーストの観測と共に、後に述べることにする。
(図 4.6)



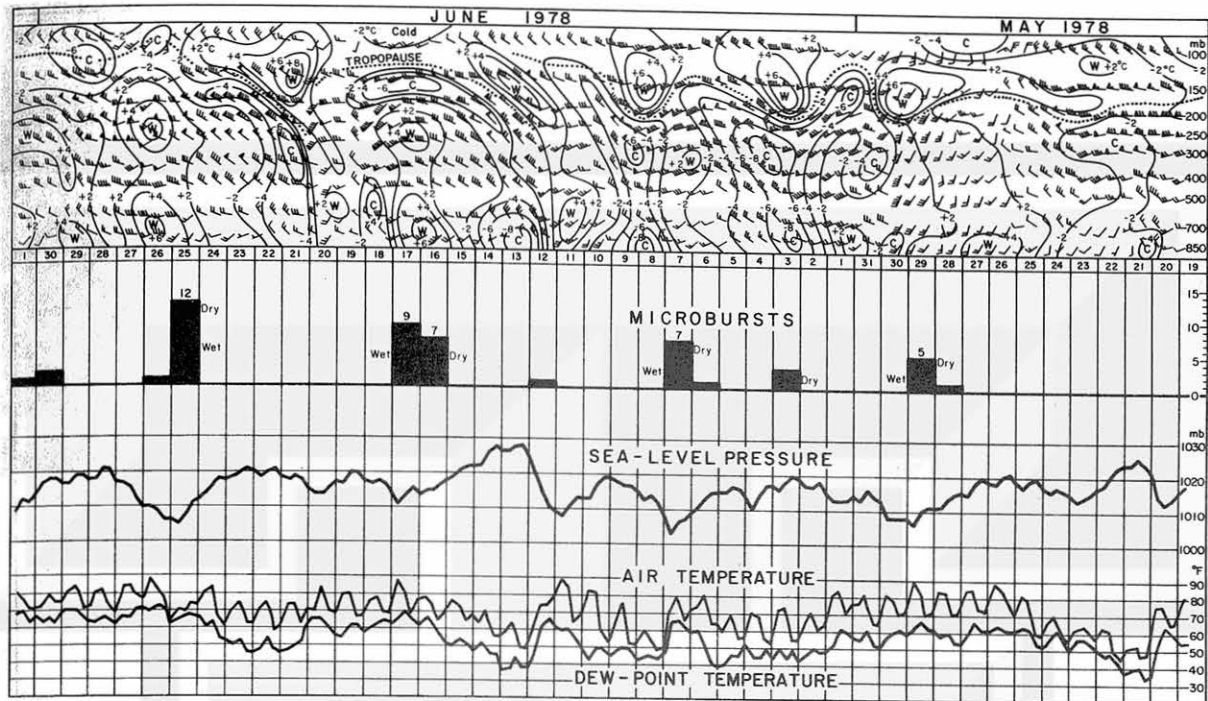
<図 4.3> ヨークビルにある NIMROD 観測網の司令部。



<図 4.4> オヘア空港の CP-4 ドップラーレーダーと PAM 塔。



<図 4.5> 2個の GMD-I と、放出前のレーウィンゾンデ。



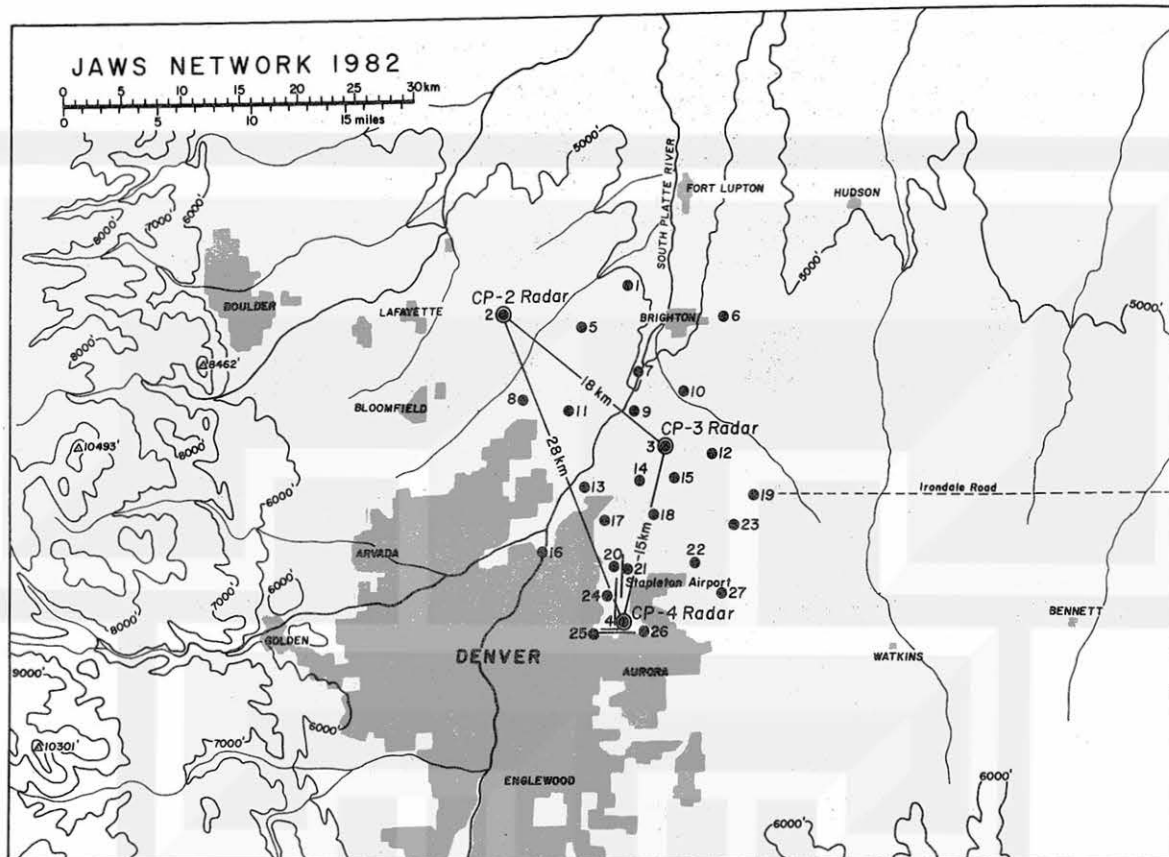
<図4.6> 1978年5月19日から7月1日まで行われた NIMROD で観測したマイクロバーストの発生頻度を気象要素と共に示したもの。

4.2 コロラド州デンバー近郊における JAWS 観測網

デンバーで行われた2回目のマイクロバーストの実体調査観測は、当該野外観測施設によりマッカーシー及びウイルソンが促進したNCARにおいて考案されたものである。高原地方上空の雲の下にある、乾燥断熱減率を持つ深い空気層が新しい型のマイクロバーストを生成するのではないかという仮説がたてられた。

最初の JAWS 計画会議はマイアミ・ビーチで、1980年4月15日から18日の第19回レーダー気象会議中に開かれた。次回の実験観測は、シカゴ大学の藤田、NCAR のジョン・マッカーシーとジム・ウイルソンを共同主任研究者として、デンバーで行うことが合意された。

最初の計画会議後2年間は、3カ月毎に NCAR とシカゴ大学とで交互に JAWS の会議が開かれた。共同主任研究者達は、経済的困難を脱したと思ったことは一度もなかったが、1982年4月までにドップラーレーダーと PAM の設置場所の選定が終了した。図4.7に示すように、ドップラー・レーダーの基線は、NIMROD 観測のものよりかなり短くなっている。一方で、NIMROD に比べてはるかに小さな領域に27の PAM が設置された。

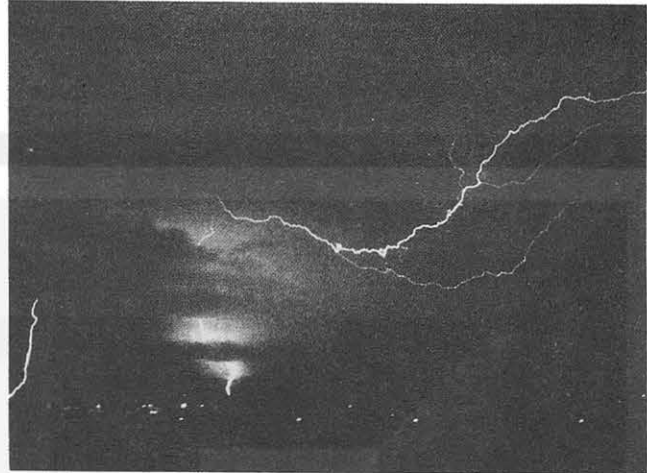


<図4.7> コロラド州デンバー市の北部郊外に張りめぐらされたドップラー三角形と27個のPAM。この観測網は、1982年5月15日から8月9日までの86日間運用された。

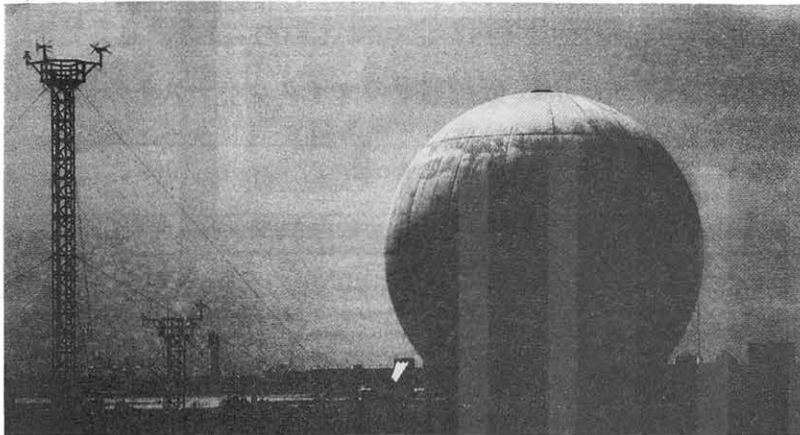
デンバー郊外に張りめぐらせた JAWS 観測網は、ボウルダーにある NCAR から車で1時間以内の距離に位置していたので、観測網の運用と整備は非常に便利で安価に行われた。

図4.8-4.10は、JAWS 観測時に撮影した写真である。雷と電光が頻繁に観測網上空に発生した。雷雲の活動がおさまると、雪でおおわれたロッキー山脈の上に太陽が低く輝き、壮観な光景がしばしば繰り広げられた。ある日の午後などは、嵐の空があまりにも暗くなり、CP-2レーダーがまっ暗な夜空に浮かぶ巨大な白いかぼちゃのように見えた。CP-2とCP-3レーダーと共にステープルトン空港に設置されたCP-4が良質なデーターを収集したため、二重三重のドップラー解析が可能となった。

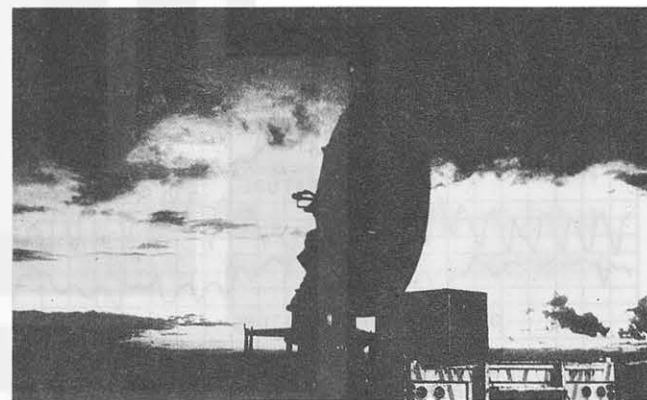
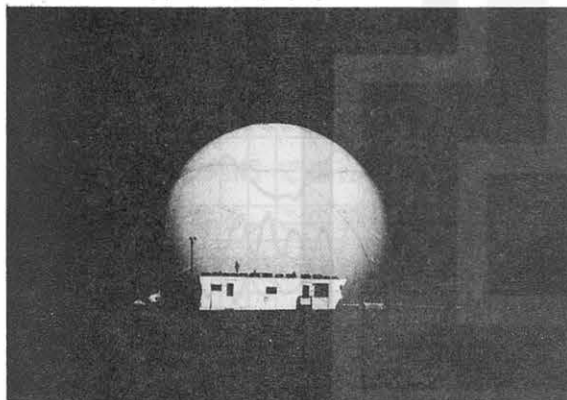
サウス・プラッテ川東方の、標高の高い所に設置されたCP-3は、マイクロバーストを発生させる雲の観測網に絶好であった。学生と共に著者は、疑わしい雲を見つけてRHIまたはPPI走査をするために多くの時間を費やした。



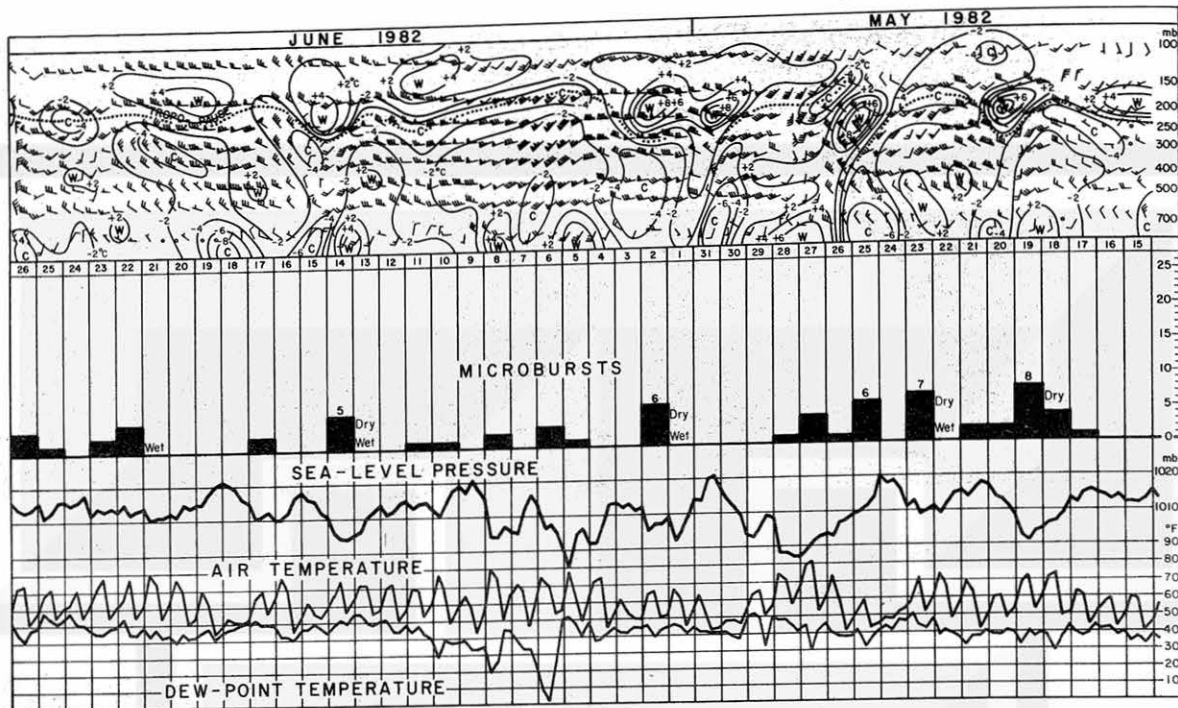
<図4.8> JAWS観測中の二重のにじ（ロジャー・脇本博士撮影）と雲間/地表と雲の間の雷電（ライアン・スミス氏撮影）



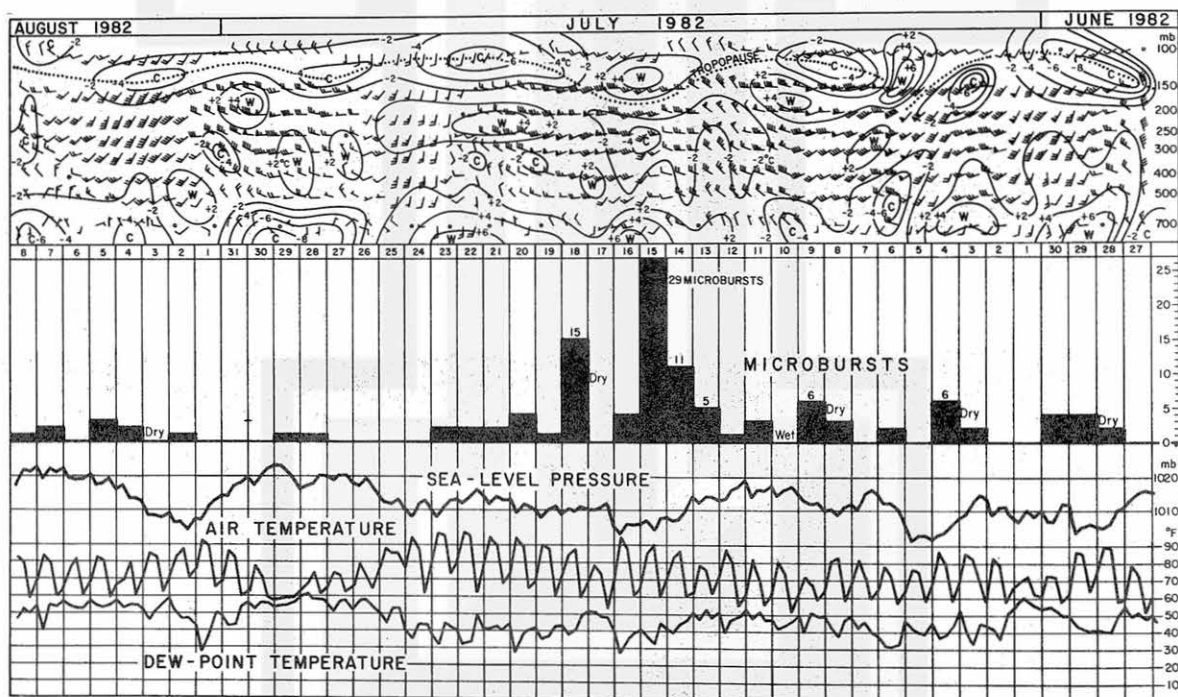
<図4.9> ステープルトン空港のCP-4ドップラーレーダーと設置中のPAM塔。



<図4.10> 暗い雷雲を背にしてそびえ立つ巨大な白いかぼちゃ（JAWSのCP-2）と、ドームをつけずに運用した JAWS の CP-3 レーダー。



<図 4.11> 1982年5月15日から6月27日までの JAWS 観測前半のマイクロバーストの発生頻度を気象要素と共に示したもの。



<図 4.12> 1982年6月27日から8月8日までの JAWS 観測後半のマイクロバーストの発生頻度を気象要素と共に示したもの。

1982年6月12日、回転している雲底が目視できた。その後雲底から発生したたつまきの完全な生涯が3基のドップラーレーダーで写された。

1982年7月9日のニューオーリンズでのパンナム759便の事故は、JAWS 観測の真最中に起こった。事故原因は、即座に空港の東部のマイクロバーストのためであるとされた。その結果 JAWS の研究者達全員は、航空機の安全運航のためにマイクロバースト現象を極力早く理解しなければならないと感じた一方で、JAWS に追加基金が下りたので、マイクロバーストの神秘の解明のための観測に拍車がかかった。

現在のところ、上層と地表の観測を行ってマイクロバーストを予測できる可能性はなさそうである。期待に反して、マイクロバーストの発生は、図 4.11 や 4.12 の上層風や温度の偏差とほとんど関連がない。この期待がはずれた主な理由は、デンバーにおけるマイクロバーストが、比較的小さな積雲からと同様に、大きな積乱雲からも発生しているという点である。これらの小さな積雲は、あまり激しくない嵐のもとで発達するものである。

4.3 コンピューターによるマイクロバーストの識別

NIMROD や JAWS 観測網は、どれも1日中1分毎に風速を収集している。これらの風速には次のものが含まれる。

1分間の平均風・・・過去1分間の平均風速

1分間の最大風・・・過去1分間の最大風速

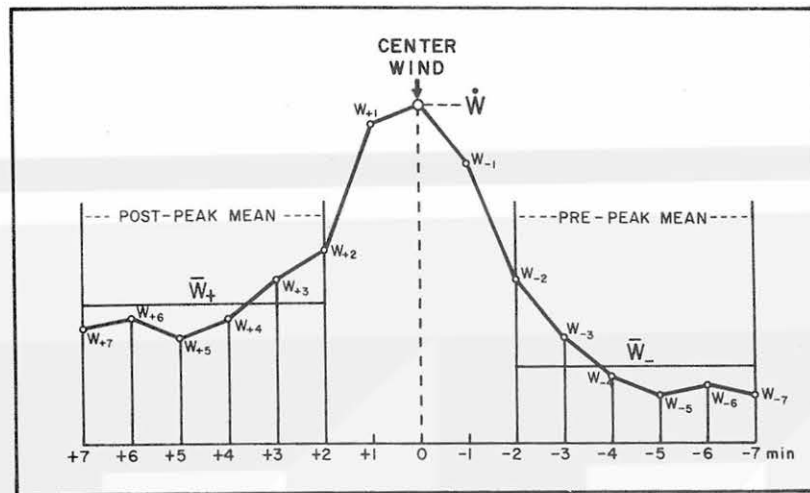
これらの中から、観測網中の PAM に影響を与えたマイクロバーストを識別するために、最大風を用いた。

統計によると、それぞれの PAM は観測期間中数多くの最大風を収集した。つまり NIMROD では61,766回、JAWS では123,956回であり、両方の観測で PAM はそれぞれ27あるので、合計 5,014,494回となる。このデータからマイクロバーストの風を効率よく分類する唯一の方法はマイクロバースト識別用のアルゴリズム（算出法）を用いて、すべてのそれらしい風の特徴を選び出すことである。

図4.13に示した通り、マイクロバーストの特徴は、中心の風速 \bar{W} をピークに持つ山型内の風速分布である。この山型内での風速のたち上がりと減少の大きさを決定するために、以下のよう
に山の前と後ろにそれぞれの平均風速を求める。吹いた風の平均値は次の式で計算する。

$$\bar{W}_- = \frac{1}{6} (W_{-2} + W_{-3} + \dots + W_{-7}) \quad \text{ピーク前の平均風速} \quad (4.1)$$

$$\bar{W}_+ = \frac{1}{6} (W_{+2} + W_{+3} + \dots + W_{+7}) \quad \text{ピーク後の平均風速} \quad (4.2)$$



＜図 4.13＞ 山型の強風で表わされる、典型的なマイクロバーストの風の変動。ピーク時前後の平均風速を求めるには、ピーク時前後の1分の風速は使用していない。

このように平均を求めるとき、ピークの1分前と1分後の風速は用いていない。というのは、山型の風速分布を持つマイクロバーストは2分から5分続くので、前後1分の風速を平均の中に入れると、平均風速が異常に増加してしまうからである。

マイクロバーストを識別するため最初のアルゴリズムは以下の6つの条件からなり、これらは同時に満たされなければならない。

条件 1. 中心の風速が10メートル/秒を越えていること。

条件 2. 中心の風速が $W+$ より少なくとも5メートル/秒以上速いこと。

条件 3. 中心の風速が $W-$ より少なくとも5メートル/秒以上速いこと。

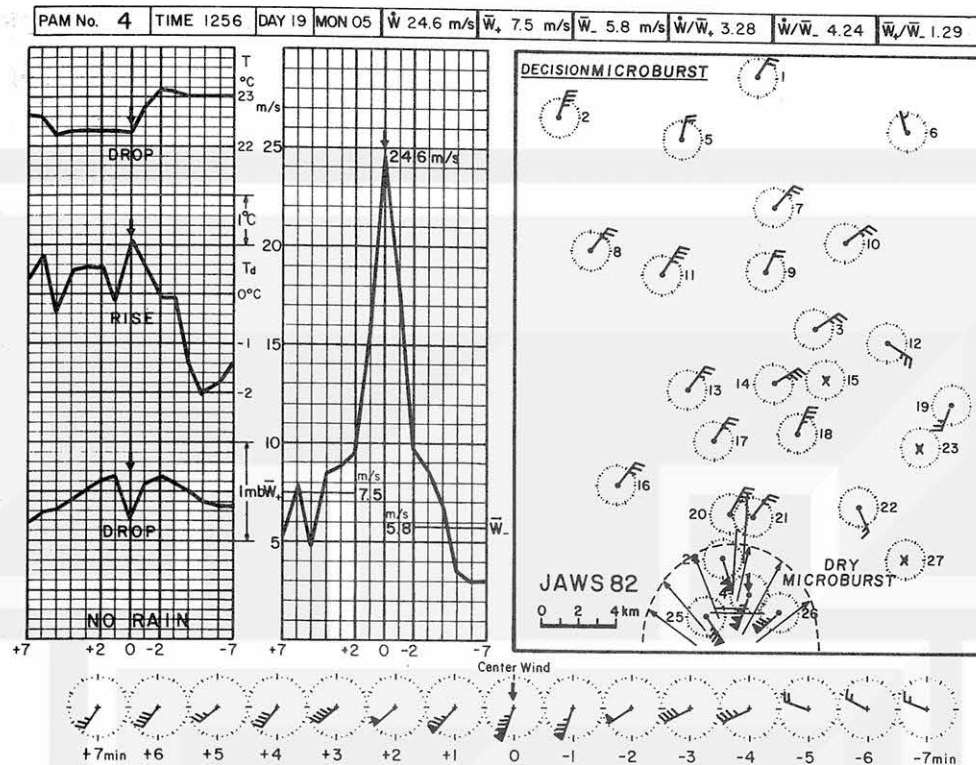
条件 4. 中心の風速が $1.25W+$ 以上であること。

条件 5. 中心の風速が $1.25W-$ 以上であること。

条件 6. $W+$ が $1.5W-$ を越えないこと。

条件1は、マイクロバーストと呼ばれるためには中心の風速は10メートル/秒 (19.4ノット) を越えていなければならないと指定している。条件2と条件3は、山型の風速分布が中心前後の平均より5メートル/秒 (10ノット) 以上増加していなければならないと言っている。条件4と5は、定常的な強風に重なっている小さな山型を除くためにある。最後に条件6、はフロント通過後の指数関数的に減衰するガストフロントを除くためにある。

初期予測のアルゴリズムを500万個の風のデータに適用して NIMROD から143個、JAWS から436個最初の初期予測マイクロバーストが得られた。



＜図 4.14＞ 本当のマイクロバーストかどうかの最終的判定を下すのに用いたマイソ解析図。この例では1982年5月19日12時56分 MDT に PAM 6 で起こったマイクロバーストが本当のものであることを示す。ステープルトン空港南部から吹き出している強風が、マイクロバーストの決定的な証拠である。

しかしながら、はっきりと識別できるマイクロバーストを個々の PAM と対比させて調べてみると、初期予測マイクロバーストの数が多すぎるのがわかる。中には本当のマイクロバーストではないものがふくまれている可能性がある。それらはただ単に、強いピークを持った風にすぎないのかもしれない。さらに先ほどの6つの条件を厳しくすると、本当のマイクロバーストまでも排除してしまうことにもなりかねないこともわかった。

この問題を解決するために、先程の初期予測マイクロバーストの風の変動をすべてマイソ解析図に書き込んだ。本当のマイクロバーストかどうかの最終的判断は、マイソ解析図を作った気象学者によって行われた。(図 4.14) 最終的に、NIMROD で50個、JAWS で186個のマイクロバーストが識別され、表 4.1、4.2 に示されている。

<表 4.1> イリノイ州シカゴ市西部郊外の NIMROD 観測網の27個の PAM によって検出された50個のマイクロバーストの一覧表。1978年5月19日11時03分 CDT から1978年7月1日07時29分 CDT までの間、PAMは毎日24時間運用された。運用時間は計42日と21時間26分となる。

Number	Time (CDT)	Day	Month	Year	PAM	Peak (m/s)	Direction (deg)	Duration (min)	Rain (inch)	ΔT (°C)	ΔT_s (°C)	ΔP (mb)
1	1841	28	May	1978	13	13.4	220	2.1	--	-1.7	+3.8	+0.1
2	2003	29	May	1978	20	17.8	160	4.8	--	-1.8	+1.4	0.0
3	2100	29	May	1978	27	14.8	200	5.5	0.02	-0.9	-0.4	+0.1
4	2148	29	May	1978	9	21.2	220	5.7	0.08	-2.4	-3.5	+0.6
5	2223	29	May	1978	10	13.8	200	3.4	0.18	+3.1	-1.9	+0.2
6	2223	29	May	1978	12	18.0	130	2.1	0.25	-2.6	+1.3	+1.2
7	1237	3	Jun	1978	26	11.5	240	3.1	--	+0.2	-0.2	+3.1
8	1307	3	Jun	1978	25	12.4	180	1.7	--	-1.3	-0.4	-0.1
9	1404	3	Jun	1978	3	15.5	260	4.0	--	-3.0	+3.9	+0.6
10	1408	6	Jun	1978	13	11.0	310	2.6	--	-0.1	0.0	0.0
11	1749	7	Jun	1978	6	10.1	220	3.5	--	-3.4	-0.4	+0.2
12	1845	7	Jun	1978	7	19.2	300	2.1	0.11	-1.5	+0.4	+0.3
13	1905	7	Jun	1978	5	10.6	300	2.4	0.07	-2.2	+0.5	+0.3
14	1905	7	Jun	1978	9	19.1	210	4.4	0.03	-3.9	+1.2	+0.2
15	1948	7	Jun	1978	12	21.8	250	1.5	0.01	-0.1	-0.4	+1.3
16	1955	7	Jun	1978	18	20.5	290	6.4	--	-2.6	-2.8	+1.0
17	2016	7	Jun	1978	27	14.9	250	2.6	0.11	-2.5	+0.7	+0.7
18	1328	12	Jun	1978	26	13.8	320	2.0	--	-2.6	+5.8	+0.2
19	1016	16	Jun	1978	1	13.8	130	2.7	0.33	-1.1	-1.3	-1.2
20	1017	16	Jun	1978	4	27.3	010	2.7	0.24	+1.6	+0.9	+0.5
21	1022	16	Jun	1978	16	22.0	330	2.9	--	+1.2	-0.2	+1.2
22	1043	16	Jun	1978	24	20.0	330	3.0	--	+1.7	-1.2	+1.3
23	1047	16	Jun	1978	23	21.0	360	1.9	--	+2.8	-1.1	+0.4
24	1055	16	Jun	1978	26	25.3	340	2.2	--	+2.0	-1.3	+0.4
25	1312	16	Jun	1978	12	14.5	190	3.2	--	0.0	-0.1	0.0
26	0340	17	Jun	1978	1	10.6	180	2.1	0.02	-0.5	+0.4	-0.9
27	0516	17	Jun	1978	21	13.4	350	4.7	--	-1.8	+0.7	+0.6
28	0522	17	Jun	1978	20	13.2	300	2.5	0.05	-3.2	+2.1	+0.3
29	0530	17	Jun	1978	23	14.0	330	4.3	0.03	-2.2	+1.2	+1.3
30	2118	17	Jun	1978	5	14.2	270	4.2	0.24	+1.1	-1.5	+0.3
31	2222	17	Jun	1978	22	16.6	250	2.6	0.10	-1.2	+0.2	+1.4
32	2302	17	Jun	1978	7	26.8	250	3.9	0.26	-0.6	-1.4	-0.7
33	2323	17	Jun	1978	27	17.9	260	2.7	0.01	-0.8	-0.2	+0.7
34	2354	17	Jun	1978	3	14.1	240	4.2	0.01	+0.3	-0.5	+0.5
35	1045	25	Jun	1978	6	13.0	010	3.6	0.01	-0.4	-0.9	-0.1
36	1134	25	Jun	1978	8	25.9	010	3.3	0.69	+0.9	-0.5	-0.5
37	1154	25	Jun	1978	9	31.3	140	3.9	0.11	-0.1	-0.3	-0.6
38	1334	25	Jun	1978	27	15.0	130	2.7	0.41	-0.6	-0.3	-0.7
39	1438	25	Jun	1978	2	23.9	330	4.2	0.72	-1.4	-1.1	+4.0
40	1450	25	Jun	1978	8	24.1	330	3.3	0.33	-1.7	-1.4	+3.1
41	1502	25	Jun	1978	19	14.4	350	5.3	0.10	+0.4	+0.5	+1.7
42	1642	25	Jun	1978	9	20.0	130	3.9	--	?	-3.7	-2.0
43	1704	25	Jun	1978	3	19.9	190	2.7	0.42	+0.9	-1.1	-3.7
44	1708	25	Jun	1978	8	16.3	360	3.6	0.31	?	?	+2.4
45	1720	25	Jun	1978	9	16.4	190	3.9	--	+3.6	-1.4	-2.9
46	1725	25	Jun	1978	13	24.1	010	2.2	1.01	+1.4	+1.2	-1.1
47	0747	26	Jun	1978	24	15.5	290	7.0	0.05	+0.4	-0.5	+0.3
48	0736	30	Jun	1978	27	11.1	300	4.9	0.05	+1.1	-1.4	+0.8
49	0831	30	Jun	1978	18	12.1	340	3.9	0.10	-0.9	-0.4	+1.1
50	0629	1	Jul	1978	7	14.4	340	4.1	--	-0.4	-0.6	+1.2

<表 4.2> コロラド州デンバー市北部郊外の JAWS 観測網の27個のPAMによって検出された186個のマイクロバーストの一覧表。1982年5月15日08時01分 CDT から1982年8月9日09時57分 MDT までの間、PAM は毎日24時間運用された。運用時間は計86日と1時間56分となる。

Number	Time (MDT)	Day	Month	Year	PAM	Peak (m/s)	Direction (deg)	Duration (min)	Rain (inch)	ΔT (°C)	ΔT_d (°C)	ΔP (mb)
1	2054	17	May	1982	24	14.9	310	2.5	0.01	-0.2	-2.7	+0.3
2	1839	18	May	1982	11	16.3	310	2.7	--	+1.6	-3.1	+0.2
3	1853	18	May	1982	10	17.3	320	3.0	--	+1.3	-3.9	+0.3
4	1855	18	May	1982	25	10.9	060	4.3	--	+1.2	+2.3	-0.3
5	1909	18	May	1982	22	18.2	150	2.4	--	+1.3	-3.7	-0.6
6	1242	19	May	1982	19	16.1	060	2.9	--	+0.4	-3.9	-0.6
7	1256	19	May	1982	4	24.6	200	2.3	--	-0.8	+2.3	+0.4
8	1308	19	May	1982	14	12.7	360	2.6	--	+1.0	-5.7	+0.3
9	1311	19	May	1982	3	13.6	060	2.9	--	+1.5	-7.7	+0.5
10	1408	19	May	1982	1	23.2	180	2.4	--	-1.6	-3.9	+0.5
11	1442	19	May	1982	27	19.1	170	3.6	--	-0.7	-0.7	0.0
12	1636	19	May	1982	18	15.7	280	2.4	--	+0.4	-2.3	+0.1
13	1727	19	May	1982	17	20.6	320	3.3	--	-0.1	-3.6	+0.4
14	0851	20	May	1982	26	10.5	130	1.2	--	+0.5	+0.2	0.0
15	1302	20	May	1982	12	13.1	050	1.6	--	+0.6	+0.6	0.0
16	1223	21	May	1982	16	12.6	350	2.4	--	+0.9	-0.7	+0.2
17	1555	21	May	1982	26	12.1	340	1.7	--	+1.6	+0.5	0.0
18	1234	23	May	1982	24	13.0	090	1.6	--	+0.8	+1.1	0.0
19	1329	23	May	1982	9	10.7	060	1.9	--	+0.4	-0.2	0.0
20	1425	23	May	1982	9	18.7	340	3.7	0.07	-2.6	-3.8	0.0
21	1435	23	May	1982	3	15.1	310	4.4	0.05	-1.1	-2.2	+0.4
22	1450	23	May	1982	20	18.4	080	2.5	0.05	-1.6	-5.3	+0.3
23	1502	23	May	1982	24	15.3	070	1.6	0.05	+1.6	+1.4	0.0
24	1709	23	May	1982	11	15.2	050	5.0	--	-1.5	+0.5	+0.2
25	1705	25	May	1982	10	11.4	030	1.6	0.01	-1.0	-2.5	-0.2
26	2152	25	May	1982	7	14.0	240	1.2	0.01	+0.9	-2.1	-0.4
27	2156	25	May	1982	9	15.4	240	2.7	--	+1.4	-3.5	-0.3
28	2159	25	May	1982	12	15.7	280	3.9	--	+0.2	+1.1	0.0
29	2212	25	May	1982	18	16.0	180	3.5	0.01	+2.8	-5.1	-0.6
30	2225	25	May	1982	21	12.6	150	2.6	--	+0.9	-2.4	+0.2
31	0854	26	May	1982	26	12.0	150	1.7	--	-0.6	-0.3	0.0
32	1305	27	May	1982	21	12.3	140	3.3	--	-0.9	-0.8	0.0
33	1425	27	May	1982	14	13.9	290	2.4	--	+0.4	-2.3	?
34	1441	27	May	1982	5	23.5	190	2.1	--	-2.0	-1.2	+0.2
35	1457	27	May	1982	1	22.2	290	3.1	--	-2.3	+3.1	+0.4
36	1551	28	May	1982	18	12.7	230	1.7	--	+1.3	+0.8	0.0
37	1517	2	Jun	1982	10	10.1	330	1.6	--	+0.5	+0.7	0.0
38	1908	2	Jun	1982	14	23.0	320	3.2	0.01	+0.4	-0.9	+0.2
39	1912	2	Jun	1982	15	22.4	320	4.0	--	0.0	-0.4	?
40	1914	2	Jun	1982	6	13.1	250	1.8	0.02	-0.3	+0.2	+1.5
41	1914	2	Jun	1982	18	26.3	340	4.2	--	+0.3	-0.9	+2.3
42	1915	2	Jun	1982	7	13.9	050	5.1	0.35	-0.8	+0.4	?
43	0235	5	Jun	1982	26	12.1	320	1.7	--	+1.7	-1.0	+0.2
44	1159	6	Jun	1982	24	12.0	280	3.4	--	-1.0	-2.3	+0.1
45	1336	6	Jun	1982	21	14.0	260	1.5	--	-0.9	-4.8	+0.1
46	1957	6	Jun	1982	14	11.9	020	2.4	--	-0.1	-2.0	+0.2
47	1522	8	Jun	1982	1	12.9	090	1.8	--	+0.5	+0.3	0.0
48	1654	8	Jun	1982	13	10.3	010	2.2	--	-0.7	+0.1	0.0
49	1734	10	Jun	1982	24	14.0	350	1.8	--	-0.2	-2.0	+0.2
50	1528	11	Jun	1982	15	14.1	080	2.9	--	+0.6	-0.9	0.0

4.4 マイクロバーストの気象要素

ほとんどのマクロバーストは、降水によって冷却された空気で作られた高気圧のドームを伴っている。マクロバーストの先端に沿って突風や気温の降下とともに、気圧の上昇やジャンプが起きる。

しかしながら、マイクロバースト中では非常に強い下降流が、広がらないで地上近くまで降りてくる。下降流内の雨滴が急速に蒸発して湿潤断熱的下降を維持しきれない場合、下降流は地表に達するまでずっと乾燥断熱的にあたたまる。しかしながら、非常に強いマイクロバーストの中では、これはほとんどあり得ないことである。というのは、マイクロバースト中の気温は、周囲に比べて高い場合も低い場合もあるからである。

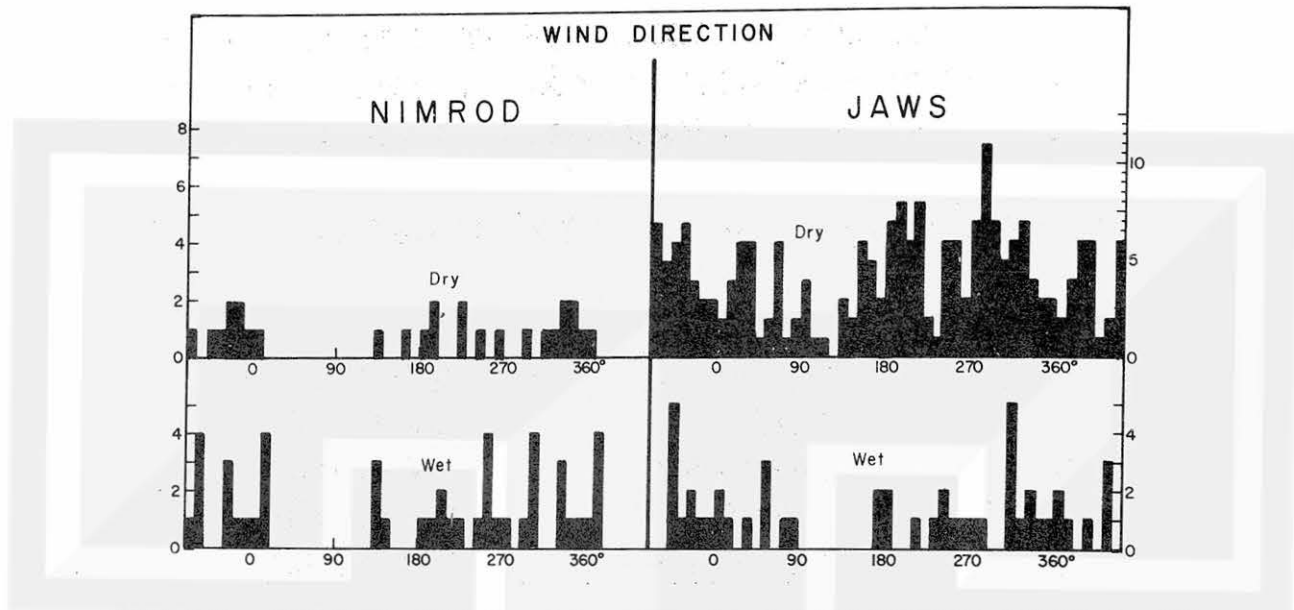
マイクロバースト中の地上気圧もまた、周囲に比べて高い場合もあれば、低い場合もあり得る。マイクロバーストの中心から外へ吹き出している風は、外へ加速される段階で気圧を失うからである。従って、マイクロバーストの気象要素の変化は、非常に複雑である。

＜表 4.3＞ マクロバーストとマイクロバーストで予想される気象要素の変化。

	マクロバースト	マイクロバースト
気温	降下	上昇または降下
露点温度	上昇または降下	上昇または降下
相対湿度	増加	増加または急減少
地上気圧	上昇またはジャンプ	上昇または降下

ピーク時の風向

マイクロバースト内の最大風は、どの方向からでも吹く。しかしながら統計的には、東風が最大風の方角となることはまれである。図4.15に NIMROD と JAWS のマイクロバーストの最大風の方角の統計的分布を、ドライ(赤)とウェット(青)に分けて示した。



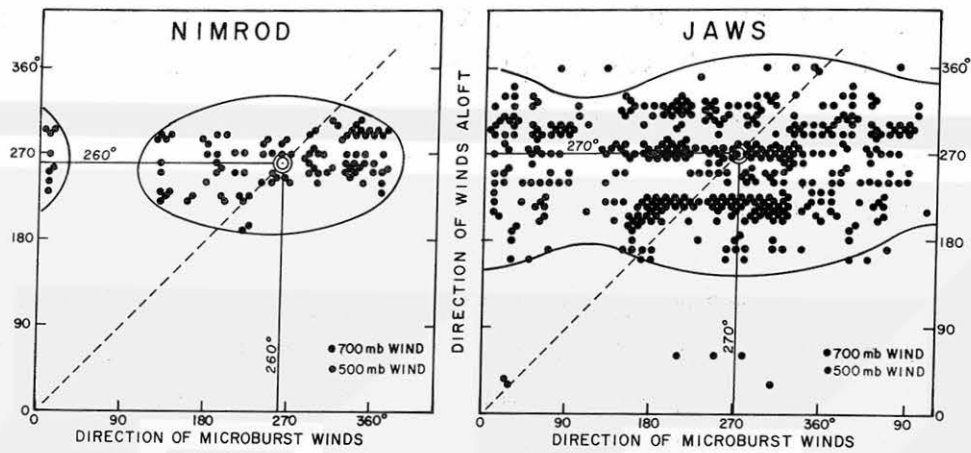
<図 4.15> NIMROD と JAWS のマイクロバーストによる最大風の方角の度数分布。27個の PAM を用いて風向を測定した。

NIMROD 観測網の最大風の方法は、 135° (南東) から 360° (北) の間が卓越している。事実上、 020° (北北東) から 120° (東南東) の間は皆無である。JAWS 観測網の最大風の方法は、 290° (西北西) に最大頻度を持つサインカーブとなっている。JAWS のウェット・マイクロバーストの数は少ないが、ドライ・マイクロバーストとウェット・マイクロバーストの頻度分布は、ほとんど同じである。

マイクロバーストは、移動する親雲から降下してくるので、最大風の方法と親雲の移動方法が一致するのではないと思われる。言い換えれば、西から東へ移動している親雲は、おそらく西から吹くマイクロバーストの最大風を発生させるであろう。この問題は、マイクロバーストの風向を上層風の方法の関数としてプロットして調べることができる。

図4.16は、NIMROD と JAWS のマイクロバーストの風向に対して、500ミリバルと700ミリバルの風向を分散図にしたものである。どちらの場合も、データの分散は非常に大きい、分散の中心は NIMROD では 260° の上層風と 260° の最大風の交点、JAWS では 270° の上層風と 270° の最大風の交点となっている。マイクロバーストを発生させる雲が700-500ミリバルの風に乗って移動していると仮定すれば、最大風の方法は700-500ミリバルの風と一致すると思われる。

しかしながら、図4.16は必ずしもそうなっていない。データーがこんなに広がって分散した1つの原因は、マイクロバーストの中心に対する PAM の位置が考えられる。例えば、マイクロバーストの中心が PAM の南方を通過すれば、最大風は南寄りの成分をもって観測されてしまう。従って、マイクロバーストから吹き出す風の方法は、マイクロバーストの中心と PAM の相対位置によって大きく変化する。

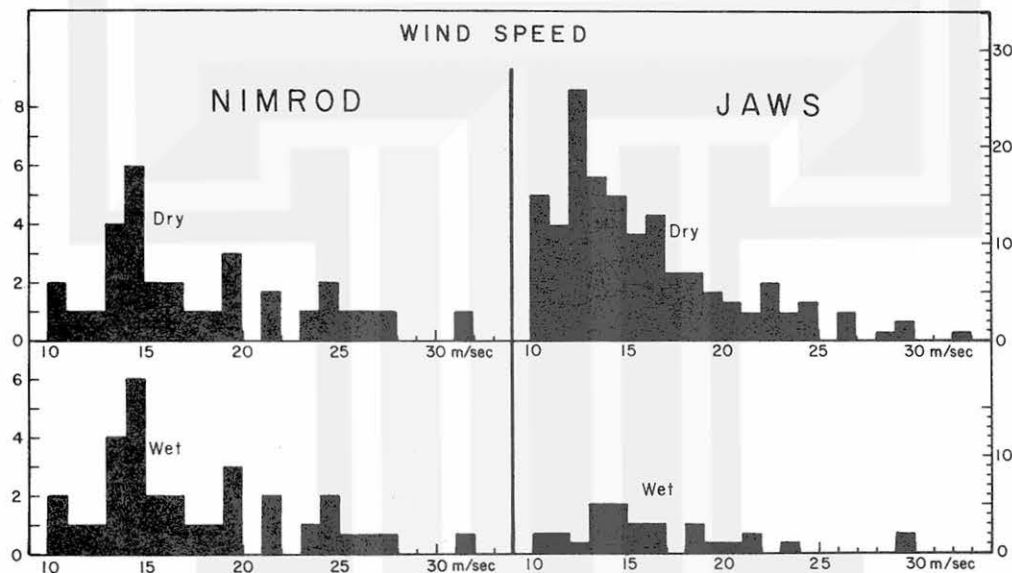


<図 4.16> マイクロバーストのピーク時の風向の関数として、500ミリバールと700 ミリバールの風向を図に表したもの。上層風の方角とマイクロバーストの風向が一致すれば、すべてのデータはどちらの図においても45° の線上にくるはずである。

広範囲にわたる分散の第2の原因としては、マイクロバーストの風が広がる地上気圧の場の水平勾配があげられる。マイクロバーストの降下して来る場所に、以前から存在しているマクロバーストやマイクロバーストの気圧場が、地表又は地表付近で、吹き出す風の分布に影響を与えることがかなりある。

マイクロバーストの最大風

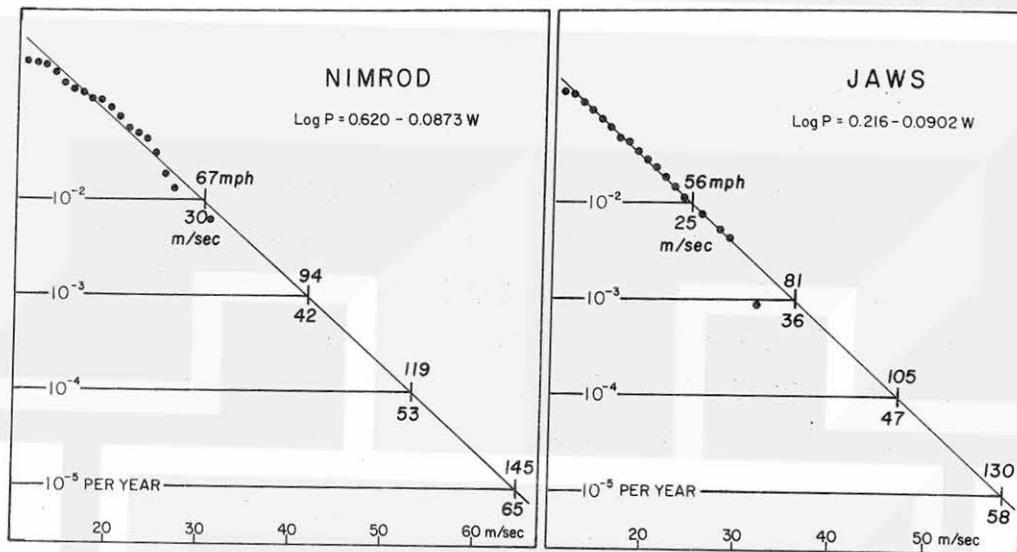
図4.17に示すように、マイクロバーストで吹く風は、最大風速が12ないし14メートル/秒(時速27ないし31マイル)になることが最も多いことがわかった。風速がこれ以上増すにつれ、発生度数は指数関数的に減少し、33メートル/秒(時速74マイル)では、事実上皆無となる。NIMROD で記録された最大の風速は31.3メートル/秒、JAWS では32.6メートル/秒(時速73マイル)であった。この風速の度数の減少傾向は、ドライ・マイクロバーストでもウェット・マイクロバーストでも変わらないし、両方の観測においても同じであった。



<図4.17> NIMROD と JAWS のマイクロバーストの発生頻度を、それぞれ27個の PAM によって観測した最大風の関数としてプロットした図。

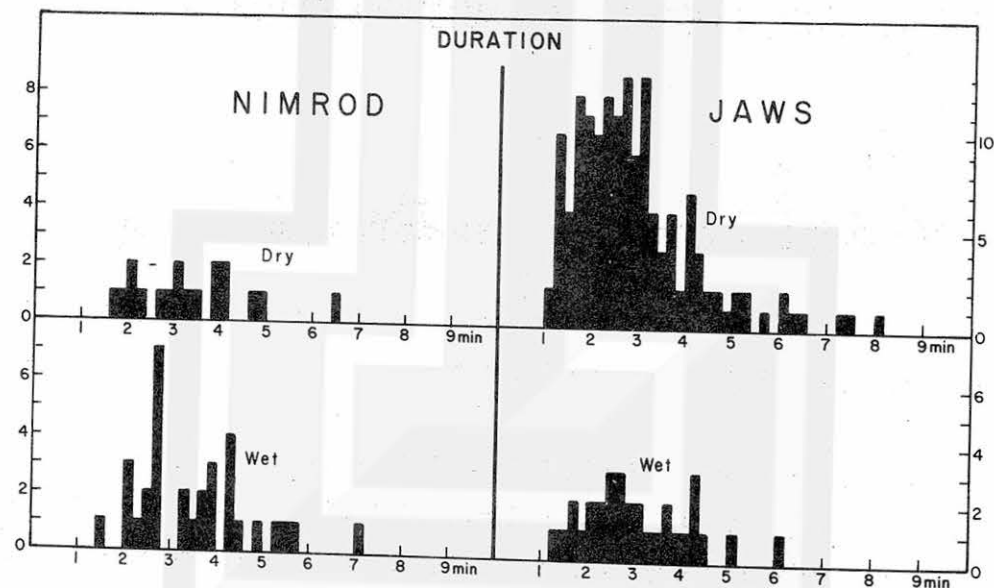
予想されたように、風速が強くなればなるほど、発生の確率は小さくなる。マイクロバーストの風の発生確率を算定するために、図4.17の度数分布を年当たり、PAM 当たりの発生確率に換算した。図4.18の風速対確率座標上のグラフでは、NIMROD と JAWS で得られたデータを、2本の直線で近似することができる。

この2本の直線を外挿すれば極端に強い風は、非常に低い確率でしか起こらないと推測される。これらの統計的結果から、年当たり PAM 当たりのマイクロバーストの度数は、NIMROD に比べて JAWS の方が高いが、最大風速は JAWS の方が小さいことがわかる。



<図 4.18> 2本の直線は NIMROD や JAWS のマイクロバーストにおける最大風速を表している。(単位メートル/ 秒)

半速風の持続時間



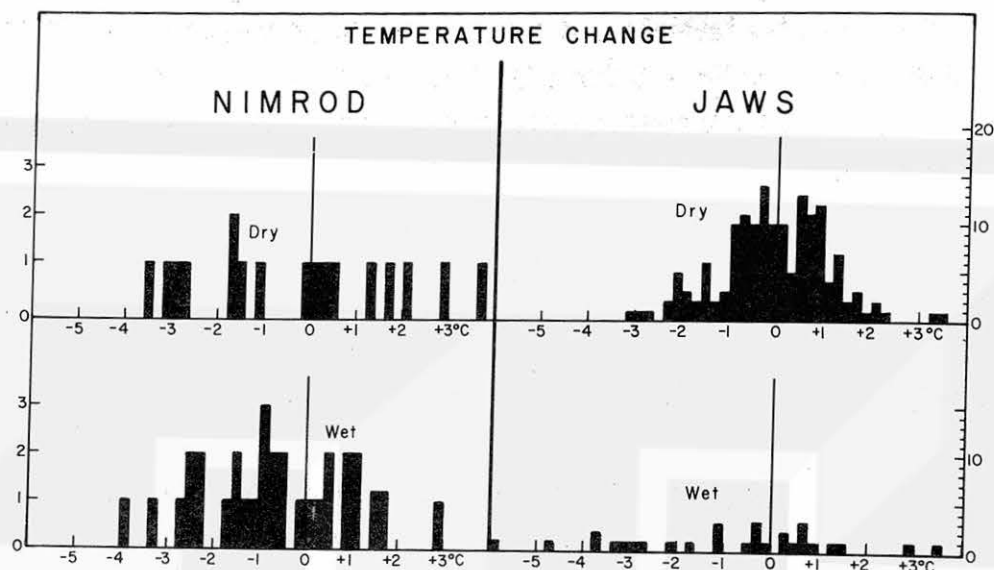
<図 4.19> 半速風の持続時間の関数として、NIMROD と JAWS のマイクロバーストの発生頻度をグラフにしたもの。

マイクロバーストの平均持続時間を、最大風速の半分の風速の持続時間(以下半速風持続時間)として定義すると、1分間から8分間の間に分布する。NIMROD と JAWS のドライ及びウェット・マイクロバーストの度数分布の型は、いずれも酷似している。半速風持続時間の平均は、約3分間である。

気温と露点温度

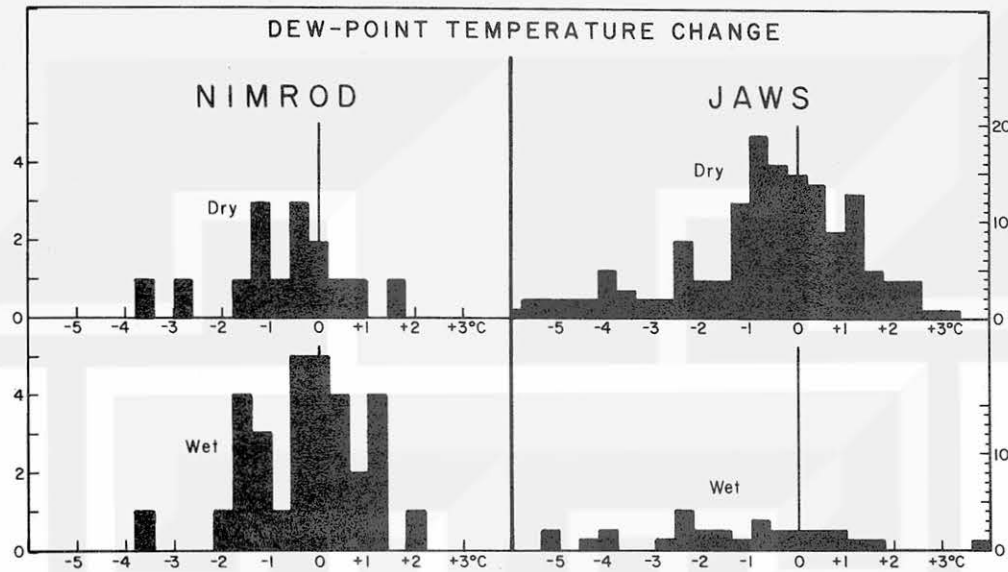
マイクロバースト中の地上気温は、周囲に比べて低いと思われるかもしれない。しかし予想に反して、図4.20に示すように、統計的には NIMROD と JAWS のマイクロバースト(ドライであろうがウェットであろうが)の約40%が、周囲より暖かいのである。

マイクロバーストが低温であろうという考えは、下降流中で落下する水滴や氷晶が蒸発したり昇華したりするために、下降流が冷却されるという視点に立ったものである。しかしながら、必ずしも下降流を低温飽和状態に保てるほど急速に、これらの粒子が蒸発するとは限らない。下向きの運動量のおかげで、暖かい下降流が地上に達することもあるのである。



<図 4.20> マイクロバースト内の気温と周囲の気温の差。正の値はマイクロバーストが周囲よりも暖かいことを示している。

マイクロバースト中の露点温度は、周囲に比べて高い場合もあれば低い場合もある。降水によって冷却された下降流中の露点温度は、比較的高いだろうと思われる。しかしながら、図4.21に示したように、統計的には高い場合もあれば低い場合もあるのである。乾燥した空気が急速に地表まで下降しながら下降流に成長してゆく時に、よく低い露点温度が現れる。

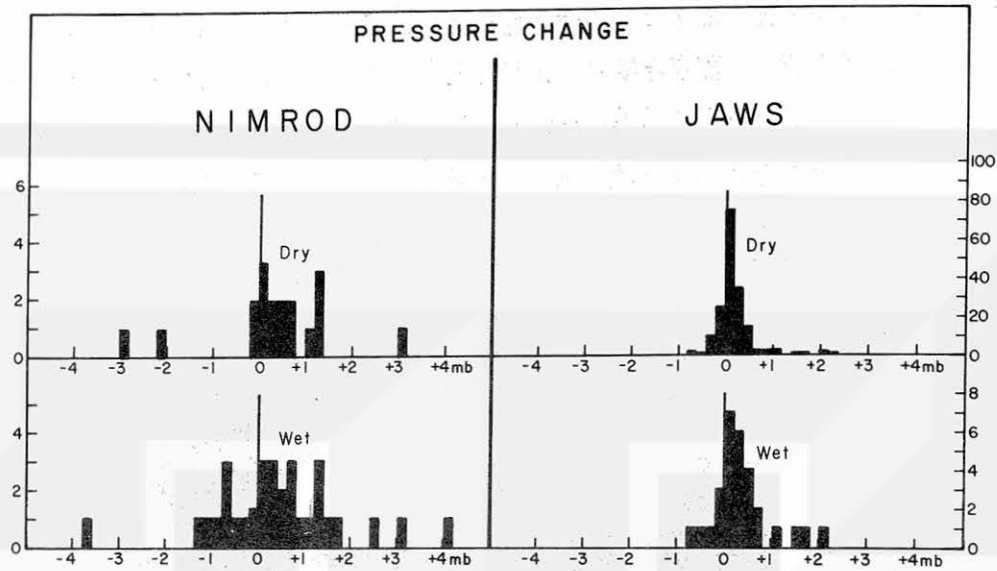


<図4.21> マイクロバースト内の露点温度と周囲の露点温度の差。正の値はマイクロバースト内の露点温度が周囲よりも高いことを示している。

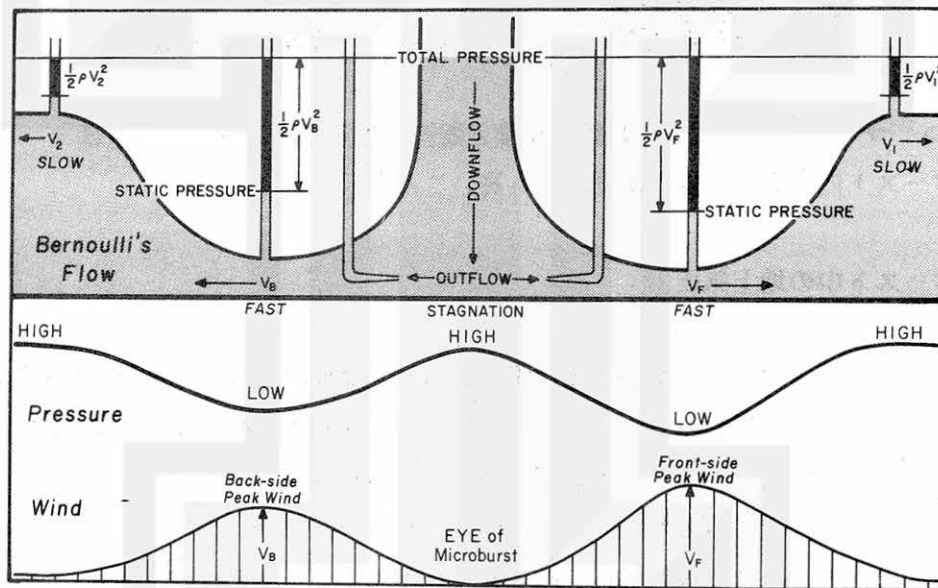
マイクロバースト中の地上気圧

マイクロバーストの中では、地表に衝突する強烈な下降流のために、地上で測定した気圧は高くなっているだろうと思われる。しかしながら最大風速が吹いた時の気圧変化の統計分布を見ると、強い風の時に必ずしも気圧が上昇するとは限らない。平均すると、地上気圧の上昇はたかだか0.1ミリバールの数倍となるくらいである。個々の場合を見てみると、2ないし3ミリバール上昇するときもあれば、下降するときもあるのである。(図4.22)

強烈な気圧変化が起こるのは、主に全圧が速度圧(=動圧)に変わってゆくからである。マイクロバーストの中心点では、地上気圧が高く空気は停滞している。マイクロバーストの中心では全圧が高いため、空気は外に向かって加速される。大気圧は吹き出しの速度が増すにつれて減少し、最大風速のところで最小値になる。摩擦のない吹き出しだと仮定すれば、ベルヌーイの定理を用いて、風速の関数として気圧変化をあらわすことができる。(図4.23)

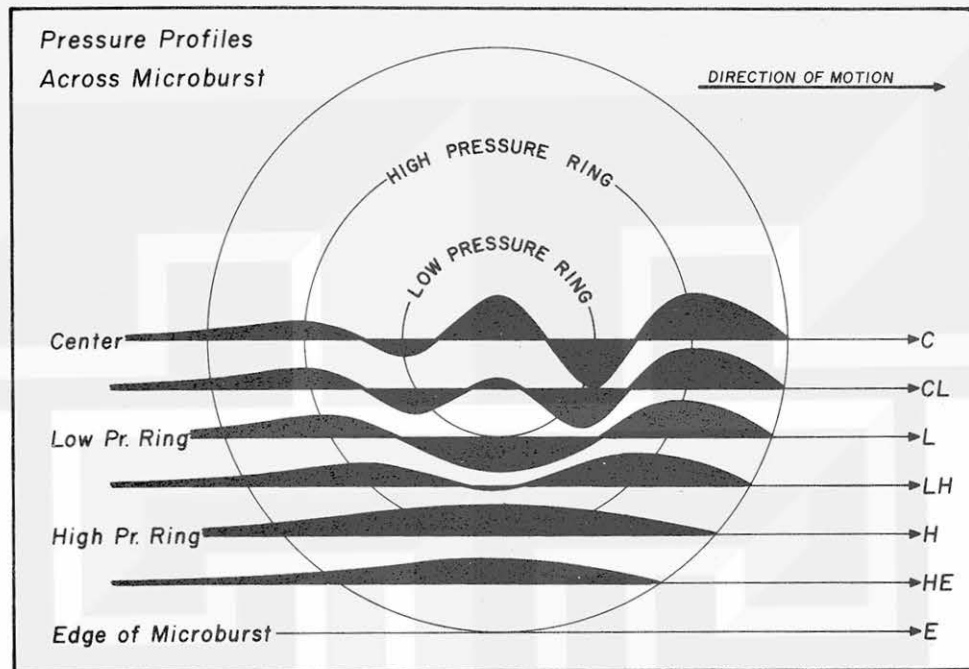


<図 4.22> NIMROD と JAWS のマイクロバースト内の地上気圧。正の気圧変動量は風速のピーク時に、気圧が周囲よりも高くなったことを示している。



<図 4.23> ベルヌーイの定理により、マイクロバーストの中心から吹き出す摩擦のない流れの中では、静圧(青色)と速度圧又は動圧(赤色)の和で表現される全圧が一定となる。PAM で用いた気圧計は静圧を測定している。

マイクロバーストの中心からどのくらい離れているかによって、マイクロバーストの地上気圧の水平分布は大きく変化する。気圧場は、マイクロバーストの中心に高圧部があり、リング状の低圧部（低圧環）に囲まれている。この低圧環は、マイクロバーストの外部境界のすぐ内側にある高圧環で囲まれている。(図4.24)



<図4.24> マイクロバーストの種々の断面における気圧分布。C--中心を通る断面、CL--中心と低圧環を通る断面、L--低圧環を通る断面、など。

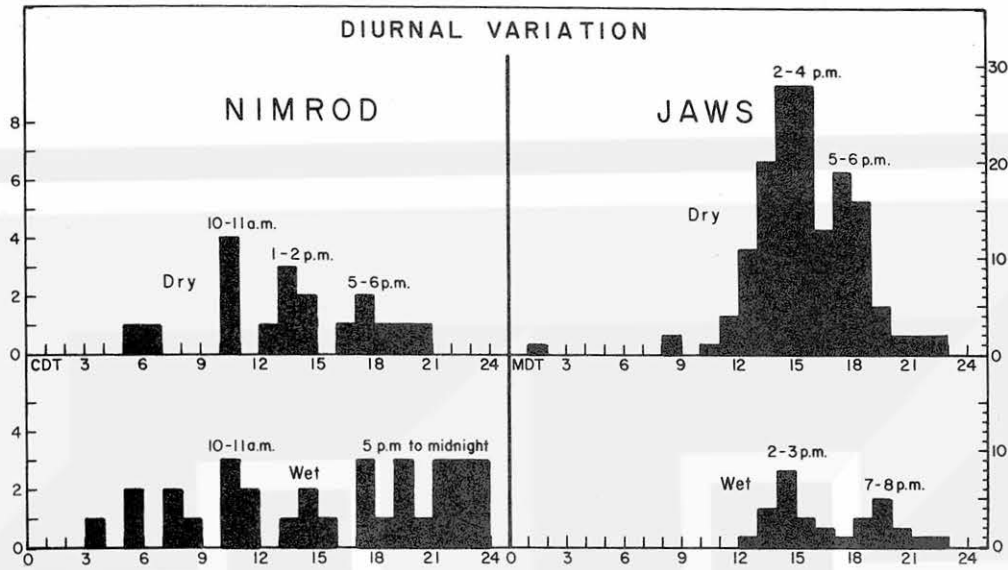
4.5 マイクロバーストの日変化、空間分布

マイクロバーストの親雲は対流雲なので、この日変化は特定地域の対流活動と密接な関係がある。

NIMROD 観測網のドライ・マイクロバーストは午前5時から午後9時 CDT に発生し、午前10～11時に集中していた。ウェット・マイクロバーストは、午後3時から深夜まで漸増し、午後5時～真夜中に最大頻度に達した。(図4.25)

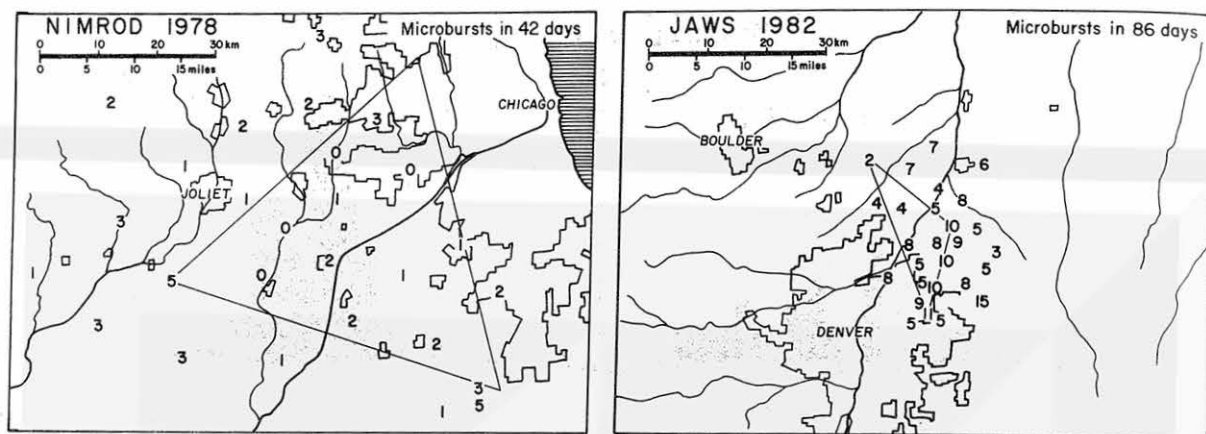
JAWS 観測網のドライ・マイクロバーストは、午後2～4時、と午後5～6時という2つのはっきりした発生頻度のピークを持っている。ウェット・マイクロバーストは午後2～3時に多発し、次いで午後7～8時に多発した。昼過ぎのピークは小規模の対流雲の発生時期と一致し、夕方のピークは午後遅くから夕方早くに発生する大きな雷雲と時期を同じくしている。





<図 4.25> NIMROD と JAWS のマイクロバーストの発生数の日変化。ドライ・マイクロバーストとウェット・マイクロバーストの発生数のピークが、全く異なった時刻にあるということは注目に値する。

NIMROD のマイクロバーストの空間分布を見ると、ドップラー三角形の西北側では発生がゼロとなっている。CP-3 と CHILL の近くの最高(5回)の発生回数は、JAWS 実験の期間である 86日当たりに換算すると10件になる。JAWS のマイクロバーストは、CP-3 と CP-4 のドップラ・レーダーを結ぶ辺に沿って多発した。事実、ステープルトン空港では、頻繁に強烈なマイクロバーストが発生した。CP-2 の近くでは、なぜかマイクロバーストが比較的少なく、86日間ではほんの2回発生しただけである。



<図 4.26> NIMROD 観測網と JAWS 観測網それぞれの PAM での、マイクロバースト発生数の空間分布。発生度数の最大値は NIMROD で 5 回、JAWS で 15 回である。NIMROD の発生度数を 2 倍したものが JAWS と同じ時期の発生度数に対応する。

第5章

マイクロバーストと親雲の種類

マイクロバーストというものは、皆同じではない。あるものは強雨を伴っているし、あるものは小さなバークの下に形成される。マイクロバーストの最初の主要な分類は、まずある特定のストームが地上に雨をもたらすかどうかという点で決められる。このように、温度の変化によっても温暖マイクロバーストと、寒冷マイクロバーストの分類が可能なのである。それはまた、形状や移動特性によっても分類することができる。

マイクロバーストを発生させる親雲は、必ずしも雷雲とは限らない。しばしば局地的な雷雲が、低高度を飛行している航空機の運航を危うくするようなマイクロバーストを生むことがある。この章に揚げたのは、1985年1月までに著者が知り得た親雲の分類に関する試案である。

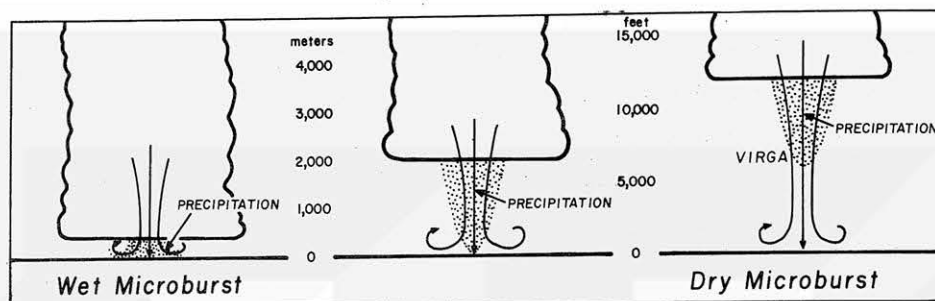
5.1 マイクロバーストの分類

ウェット・マイクロバーストとドライ・マイクロバースト

NIMROD および JAWS 観測以前には、著者はマイクロバーストのほとんどは強雨の中で発生する、と推定していた。この考えは、後になって誤りであることが判明した。表1.1 に示したように、NIMROD では36パーセント、JAWS では83パーセントのマイクロバーストが地上に達するような雨を伴っていなかった。この統計によると、乾燥地帯でのマイクロバースト中の雨滴は、地表に達する以前に完全に蒸発してしまうことがある、という事実を示している。下方向への勢いを一旦得ると、雨滴を伴わない下降気流は地表に達し、マイクロバーストを発生させることがある。

米国内の湿潤地帯、例えばルイジアナ州、フロリダ州では、ほとんどすべてのマイクロバーストが強雨を伴っている。ニューオーリンズでのパンアメリカン 759便の事故も、フィラデルフィアでのアリゲニ航空 121便の事故も、いずれもマイクロバーストを横断する際、豪雨に遭遇している。

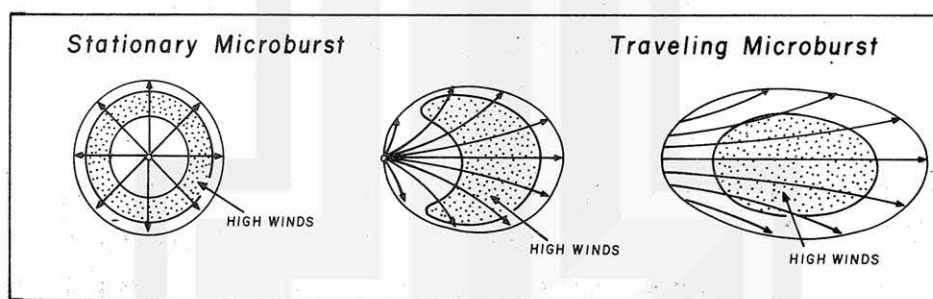
一般的に、乾燥地帯での雲底の高い雲から落下する水滴は、地表に達する前に十分な時間と距離があるから、空中で蒸発してしまう。更には、雲の下方の空気層の相対湿度が低いため、蒸発は促進されることになる。(図5.1)



<図5.1> ウェットおよびドライ・マイクロバーストの断面図。ウェット・マイクロバーストは世界の湿潤地帯に発生が予測されるのに対し、ドライ・マイクロバーストは通常雲底の高い対流雲が発生する、乾燥地帯に見られる。

停滞性および移動性マイクロバースト

もし停滞性のマイクロバーストが内部に障害物のない状態で発散すると、環状の強風域を伴った完全な型をしたスターバーストとして観測される。しかし、実際にはマイクロバーストのもつ運動性が、気流を円型から楕円型に変えてしまうのである。前面の風が強まるのに対し、後面の風は弱まるので、強風域は三日月状となる。(図5.2)



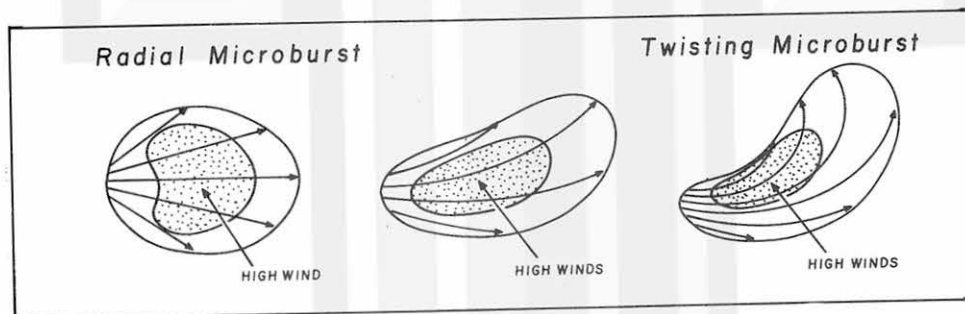
<図5.2> 移動速度の差異に伴う、マイクロバースト内の気流の変化。停滞性のマイクロバーストは、環状の強風域を伴ったスターバースト気流をつくる。

移動速度が大きいマイクロバーストの特徴は、直線または互いに平行な風の流線である。この種の風は、“直線風 (Straight-line wind)”とよばれている。空中調査および被害の原因となった力を詳細に図示してみると、移動速度の大きいマイクロバーストの風の及ぼす影響を識別することができる。

放射線型および曲線型マイクロバースト

マイクロバーストの風が回転していない限り、流線は放射状となる。しかし、強いメソスケールのサイクロン (メソサイクロン) の中にマイクロバーストが降りてくると、地表面における気流は反時計方向にねじ曲がった (わん曲した) 流線となる。このタイプのマイクロバーストは、巨大雷雲から生まれたたつまきの空中調査の際、確認されている。(図5.3)

たつまきの被害状況を地図上で調べてみると、そこにしばしば発見されるのは、たつまきの終末期の進行経路の幅の広がりである。たつまきの進行経路の末端の幅が2から3マイル (3から5キロメートル) になると、気流のパターンは曲線型マイクロバーストのそれに非常によく似たものとなる。しかし現時点では、たつまきは消滅期にマイクロバーストになるのかどうかということを決定する資料はない。

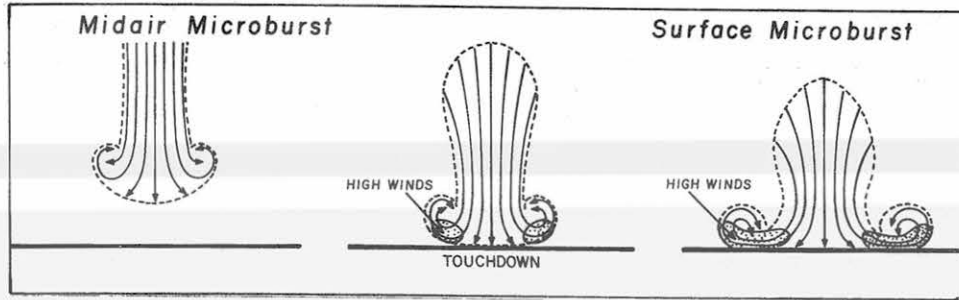


<図5.3> 直線状の吹き出しという特徴をもつ放射線型マイクロバーストと、ねじ曲がった流線をもつ曲線型マイクロバースト。曲線型マイクロバーストは、メソサイクロン中によく発生する。

空中および地表のマイクロバースト

いかなるマイクロバーストも、地表面付近で形成されることはない。それらは対流性の雲の雲底から、降下してくるのである。風力計の高さ以上のところでマイクロバースト特有の風を吹かすものを、“空中のマイクロバースト(midair microburst)”と呼ぶ。空中のマイクロバーストは、消滅するまで空中に浮揚しているか、あるいは地表面に向かって降下を続ける場合がある。

地表面に接地したマイクロバーストは、“地表のマイクロバースト(surface microburst)”と呼ばれる。地表のマイクロバーストが広い範囲に発散するとき、下降気流は地表に到達するまで空気を送り続ける。その後、マイクロバーストは平たくなって、発散は終了する。

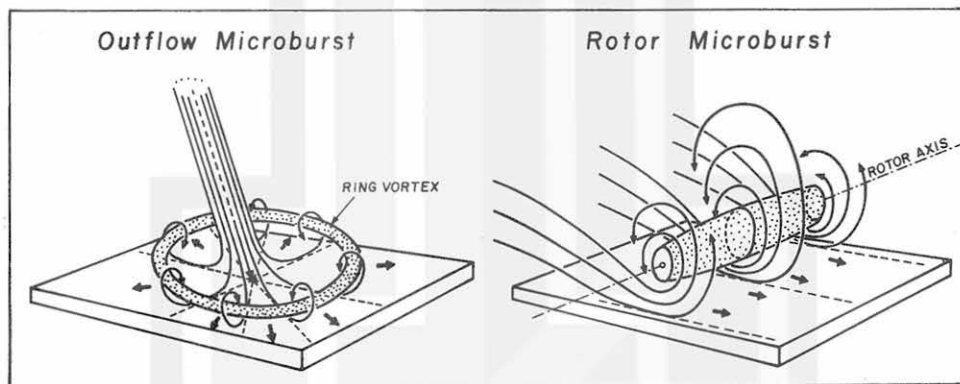


＜図5.4＞ マイクロバーストが降下する3過程。空中のマイクロバーストは、地表まで降下することもあり、降下しないこともある。地表に到達する際には、吹き出しの風は接地直後、急速に発散する。

吹き出し型および回転円筒型マイクロバースト

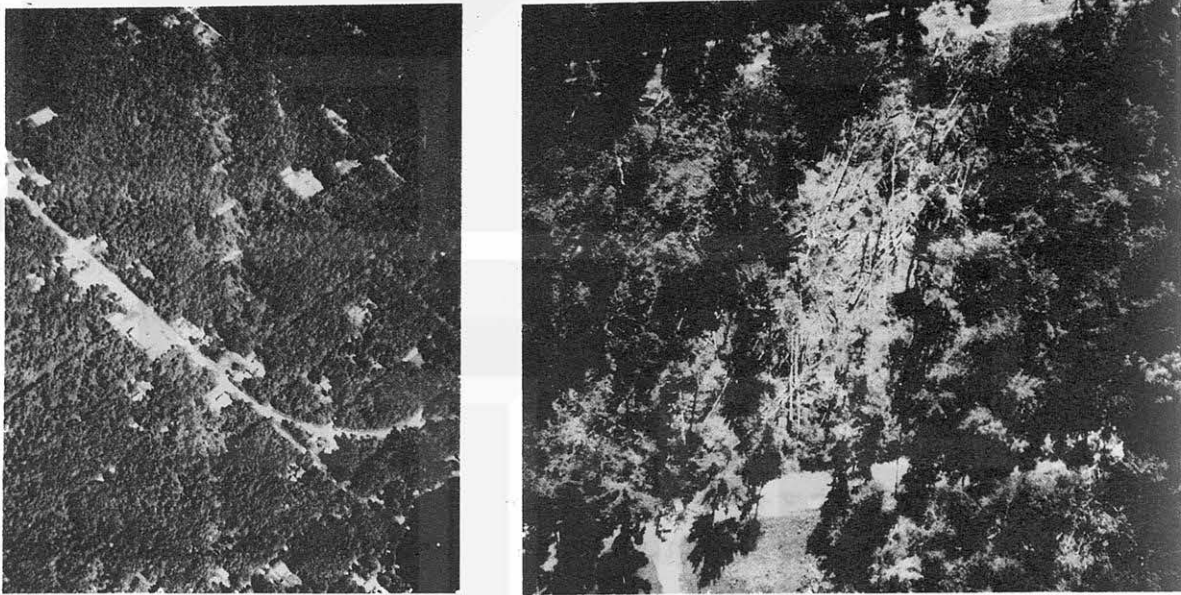
強い下降気流と吹き出しを伴ったマイクロバーストを”吹き出し型マイクロバースト(outflow microburst)”と呼ぶ。このタイプは、NIMROD および JAWS 観測中によく記録されたマイクロバーストである。観測記録を見ると、移動速度の小さな吹き出し型マイクロバーストは、常というわけではないが、しばしば環状の渦に囲まれている。(図5.5)

環状の渦は、地表に達したマイクロバーストが時間を経るにつれ、限界に達するまで伸張し続けるのである。その後、渦はそれぞれに数個の渦のロールに分断される。これらの渦のロールのいくつかは、強風のコアを誘発し、2ないし3分の寿命で発生源から走り去ってゆく。



＜図5.5＞ 吹き出し型マイクロバーストは、最もよく観測されるタイプのマイクロバーストである。回転円筒型マイクロバースト(rotor microburst)の中には、マクロバーストの域内、ガストフロントの後面で発達するものがある。

”回転円筒型マイクロバースト”は走り去ってゆく渦のロールで、その風は帯状の風の被害を残してゆく。このマイクロバーストは、蒸気ローラ〔道路舗装用器具〕または水平軸を持つ渦を伴ったたつまきのような活動をし、狭いスウォース〔一条の草薙り跡のような帯〕の中で建築物を破壊したり、樹木を引き抜いたりする。このような幅の狭い被害が轟音を伴って発生するため、かつて回転円筒型マイクロバーストは、誤ってたつまきとされたことがあった。1981年、藤田と脇本は回転円筒型マイクロバーストによるスウォースを”バースト・スウォース”と命名した。(図5.6)

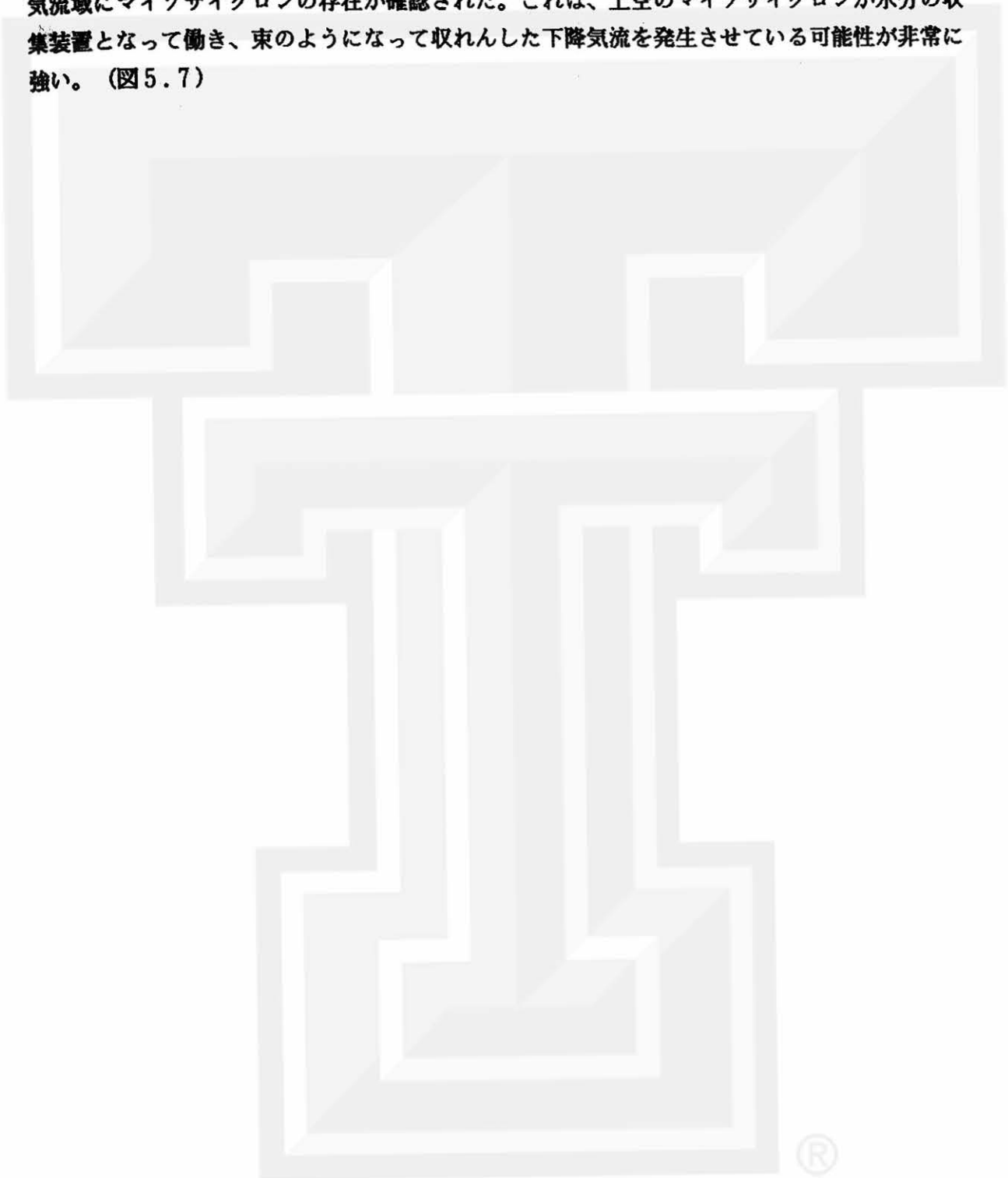


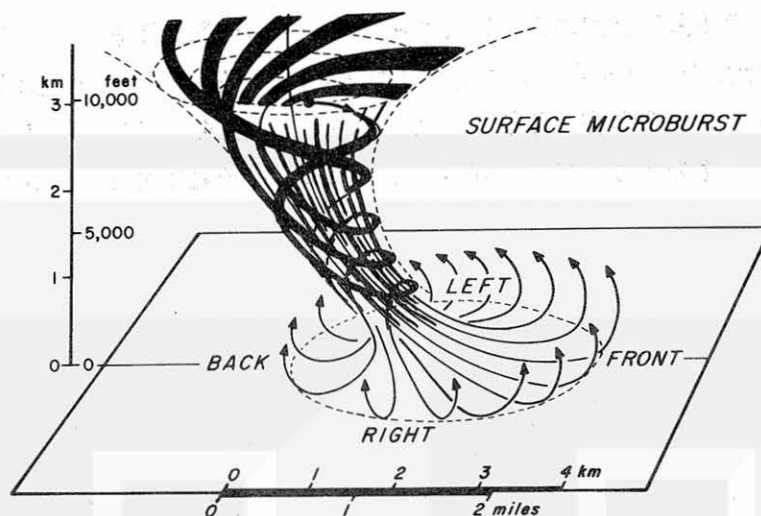
<図5.6> 1977年7月4日、ウイスコンシン州ノースウッド・ビーチで回転円筒型マイクロバーストによってできたバースト・スウォースの空中写真。空中撮影—藤田。

マイソサイクロン (マイソスケールの低気圧) を伴ったマイクロバースト

吹き出し型マイクロバーストから吹き出す風は、ほとんどが非回転性のものである。これは吹き出しの流線が吹き出しの中心付近で回転することなく、放射線状に発散することを意味する。しかし、JAWSでのドップラー・レーダー観測によると、上層風は下降気流がまだ発散しない高度で、明らかな回転の兆しを見せている。回転は90パーセントが反時計方向で、残りの10パーセントが時計方向となっている。

マイクロバーストの下降気流が潜んでいるマイソスケールの低気圧を、“マイソサイクロン”と言う。JAWS 観測中、ワイオミング大学のキングエアー機で測定した上層風でも、下降気流域にマイソサイクロンの存在が確認された。これは、上空のマイソサイクロンが水分の収集装置となって働き、束のようになって収れんした下降気流を発生させている可能性が非常に強い。(図5.7)





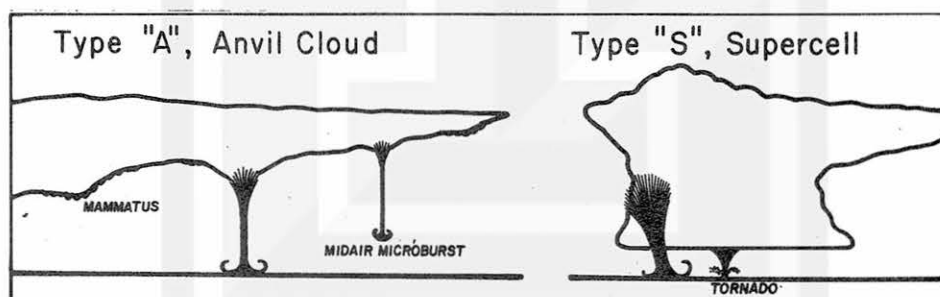
<図5.7> 上空のマイソサイクロンを伴った地上のマイクロバーストの概念図。直径4キロメートル以下のマイソサイクロンの多くは、例外的なものを除いては、反時計方向に回転している。

5.2 親雲の分類

タイプ“A”かなとこ雲とタイプ“S”巨大雷雲

JAWS 観測中、われわれは最盛期を過ぎたかなとこ雲から降下しているバーガの下に、マイクロバーストが発生するのを目撃した。しかし湿度の高い地帯では、かなとこ雲から地表までマイクロバーストが下降してくるとは考えられない。

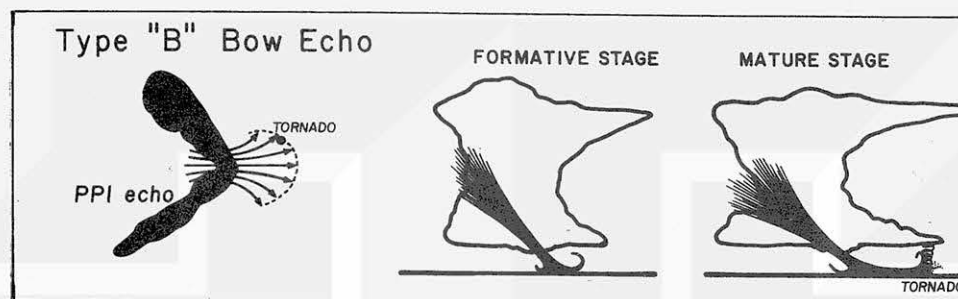
巨大雷雲が、強いたつまきを発生させるようである。雷雨が去った後の空中調査では、たつまきの近辺にマイクロバーストの風の存在がしばしば確認され、これら2つのタイプのストームは、互いに関係があることを示唆している。しかし、力学的関係については、まだ知られていない。



<図5.8> 乾燥地帯のかなとこ雲の下で、マイクロバーストが発生する様子を示した概念図。巨大雷雲は、たつまきとマイクロバーストの発生源である。

タイプ”B”弓型雷雲

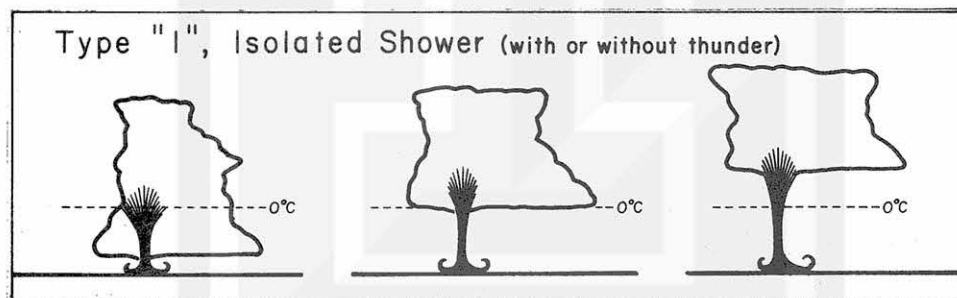
弓型のエコーは、強烈なマクロバーストおよびマイクロバーストの発生源である。通常、強風は弓に矢をついだ部分から押し出される。弓型エコーの発達期には、たつまきとマイクロバーストは同時に発生することがある。吹き出す風の消滅期においては、水滴は急速に吹き飛ばされ、風の発生源からエコーは消滅してゆく。



＜図5.9＞ 弓型エコーの形状とマイクロバーストの発生期と最盛期を示した概念図。

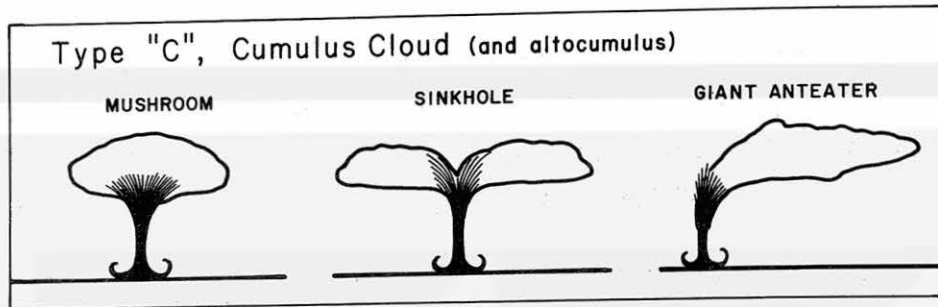
タイプ”I”独立性しゅう雨

雷を伴っていようが、いまいが、独立性しゅう雨はマイクロバーストを発生させる。実際、イースタン66便およびパンアメリカン759便の事故原因となったマイクロバーストの親雲は、比較的小さく短寿命の独立した雷雲であった。だが、事前にタイミング良く警報を出す上で障害となっている主要な問題は、独立した雷雨のすべてがマイクロバーストを発生させるわけではない、ということである。更には、レーダー・エコーの強度と、そこから誘発されたマイクロバーストの風速は、実質的に無関係なのである。これは、パイロットが雨のみを写し出し、風を表示しない現用の機上用レーダーの情報に基づき、着陸するか、着陸復行するかの判断を下すことは不可能である、ということを意味する。



＜図5.10＞ 発生地域および季節毎に変化する、タイプ”I”雷雨の凍結高度。雲底の温度は0℃以下のものは”冷たい雲底”、その他のものは”温かい雲底”と表現される。

タイプ" C " 積雲



<図5.11> タイプ" C " 親雲の3種類。キノコ型雲、スリバチ型雲、大アリクイ型雲等々である。将来、更に異なったタイプの雲が追加されることになるう。

タイプ" C "の親雲は、大型の積雲で、時には塔状高積雲の形状を持つこともあり、そこから降る雨は地上に達することもあり、達しないこともある。JAWSでの観測記録によれば、これらの雲は、キノコ型雲、スリバチ型雲、大アリクイ型雲の3種類に分類することができる。

"キノコ型雲" (例：リット・カーボン・マイクロバースト、1982年7月14日、ページ97参照) は、独立した大型の積雲で、マイクロバーストはその中心から下降してきた。エコーの頂上は空気の流入してくる高度よりはるかに高いので、小山のような型をした雲頂は下降気流の影響を受けることなく、マイクロバーストの活動中もキノコ型の形状を保っている。

"スリバチ型雲" (例：フラット・タイヤ・マイクロバースト、1982年5月19日、ページ85参照) は積雲で、垂直方向の発達小さいものである。雲全体は、そこから発生するマイクロバーストに流れ込む空気層の中にスッポリと入り込んでいる。スリバチは、最盛期とその後にマイクロバーストの下降気流の直上の雲頂で形成される。

"大アリクイ型雲" (例：大アリクイ型マイクロバースト、1982年7月16日、ページ100参照) は、積雲または氷結した雲頂を持つ高積雲である。雲の風上側で下降気流が形成されると、雲底は下がりはじめ、大アリクイの頭部のような型になってくる。マイクロバーストは、地上に達するまで下がり続けるこの頭部から降下してくる。地表のマイクロバーストが形成されると、頭部全体が地表まで降下し、首のない大アリクイの姿となる。このタイプの雲は RHI 走査によってのみ発見できるものであり、PPI 走査の繰り返しでは不可能である。

第6章

事例研究

たつまきの統計は1916年からあるのに対し、米国でのダウンバーストの発生頻度についてはほとんど知られていない。しかし、NOAAの発行している“STORM DATA”誌中の、“その月の顕著な嵐”によれば、至るところからダウンバーストの発生が報告されているのである。1981年からの例をいくつか拾ってみると、カリフォルニア州インディオで2台のボックス・カー転倒（1981年8月12日）、ジョージア州メイコン近郊で倉庫損壊（1982年3月21日）、イリノイ州スプリングフィールド市内でクルマの転倒（1982年5月20日）、サウスダコタ州スー・フォールで激しいマイクロバースト発生（1982年7月6日）、コロラド州ジェフコ空港 200万ドルの被害（1982年8月20日）、ルイジアナ州バトン・ルージュで155家屋損壊、11人負傷（1983年1月31日）、フロリダ州ジャクソンビルで時速113マイルの突風記録（1983年2月2日）、テキサス州ヒューストンで6人死亡（1983年5月20日）、ウイコンシン州でダウンバースト大発生（1983年7月3日）、オクラホマ州ブローケン・アロウで学校損壊（1983年10月3日）、カロライナたつまきによる3個のダウンバースト（1984年3月28日）、マサチューセッツ州で5エーカーの松林倒壊（1984年3月29日）、サウスダコタ州ローウィナで2人死亡（1984年6月11日）等々であるが、詳細は“STORM DATA”誌を参照されたい。

表6.1は、図4.18に示したNIMRODおよびJAWSの統計で得た平均確率から計算した、マイクロバーストの発生頻度である。これはPAMが2キロメートル以内に発生したマイクロバーストを検知できるという仮定と、年間を通してマイクロバーストは全米で均一に発生する、という仮定に基づいている。この表によれば、被害を及ぼすようなマイクロバースト（風速75マイル/時以上）の発生は、年間3,510個と推定され、たつまきの4倍の発生頻度となるのである。

この章にあげた事例は、NIMRODから3例、JAWSから6例となっている。加えて、アンドリュース空軍基地における時速149マイルのマイクロバーストと、水上での事故についても言及した。最後に、テネシー州メンフィス空港のFAA（連邦航空局）の観測網からの事例を紹介した。

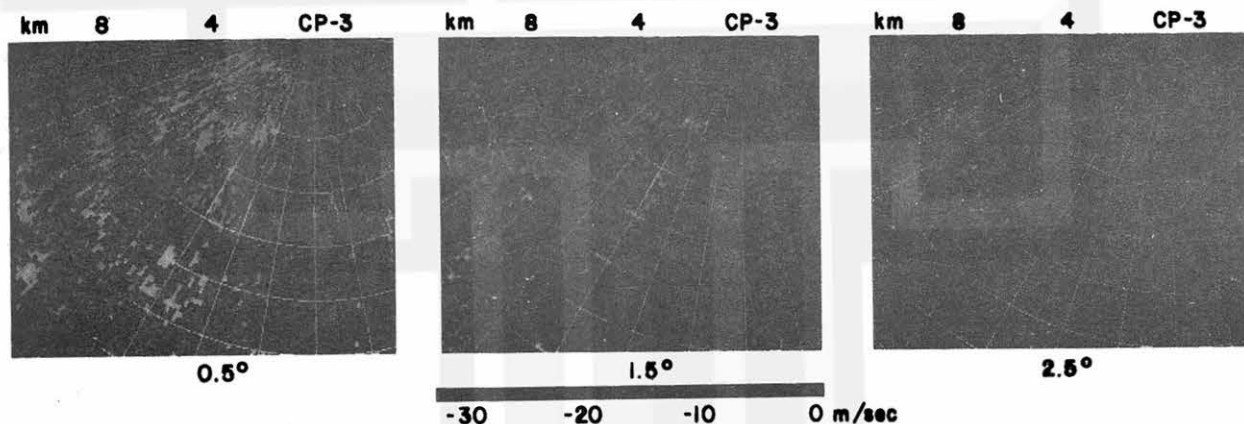
<表6.1> 全米で年間に発生が予想されるマイクロバーストの数

風速 (マイル/時)	50	75	100	125	150	170
(メートル/秒)	22	33	45	56	67	78
発生確率 (年間)	3.4×10^4	3.5×10^3	3.7×10^2	3.5×10^1	3.6×10^0	3.8×10^{-1}
発生頻度 (年間)	34,000回	3,510回	367回	38回	3.9回	0.4回

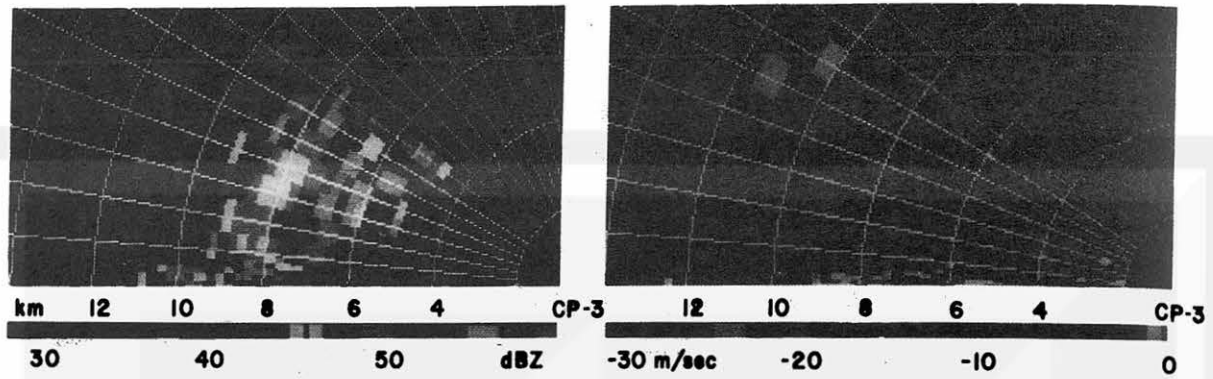
6.1 ヨークビル・マイクロバースト - 1978年5月29日

それは21時33分 CDT、闇夜のことであった。イリノイ州ヨークビルに設置されたCP-3 ドップラー・レーダーの南東で、ひと筋の電光（稲妻）が走り、小さな雨雲が照らし出された。早速、マイクロバーストを探知するためのレーダー観測体制が敷かれた。21時36分4秒、最初に行なわれた走査で、高度角 0.5度、地上70メートル(230フィート) に31メートル/秒（時速69マイル）の速さで接近している噴流の存在が確認された。レーダーの高度角を上げると速度は急激に減少し、1.5度では26メートル/秒（時速58マイル）、2.5度では24メートル/秒（時速54マイル）であった。図 6.1は、マイクロバーストの PPI 画像で、風はオレンジと黄色で囲まれた部分となっている。

図 6.2 は、CP-3 レーダー方位角 208度の断面画像で、反射率（左）と速度（右）を示している。



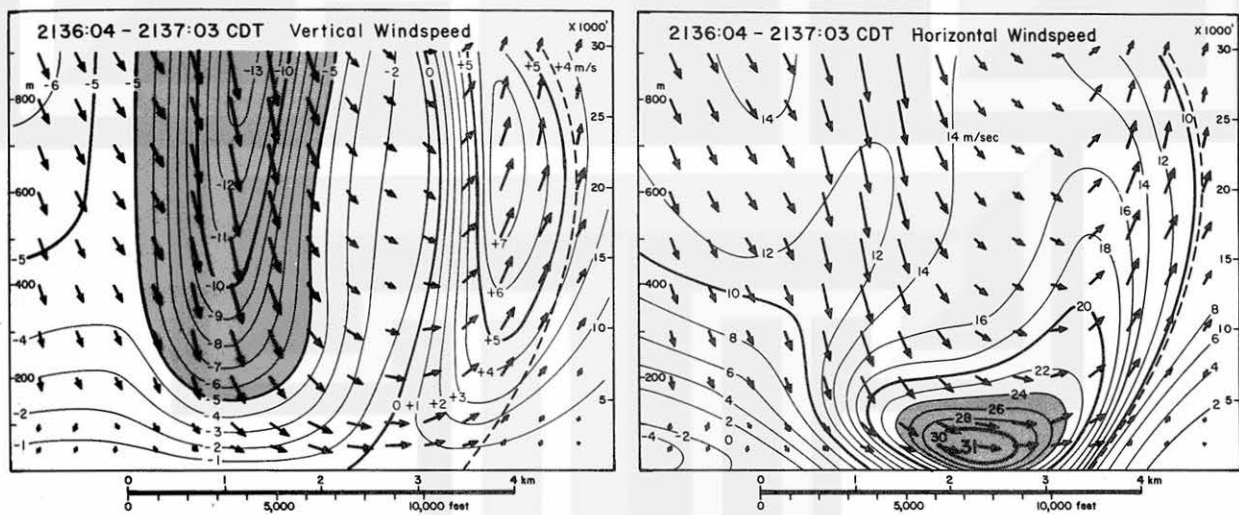
<図 6.1> RDSSの画像は、ヨークビル・マイクロバーストの、21時36分4秒 CDT に開始した走査による3つの高度角からの速度を示している。速度の重複表示のために、-17メートル/秒（時速38マイル）以上のカラー・バーは暖色となっている。



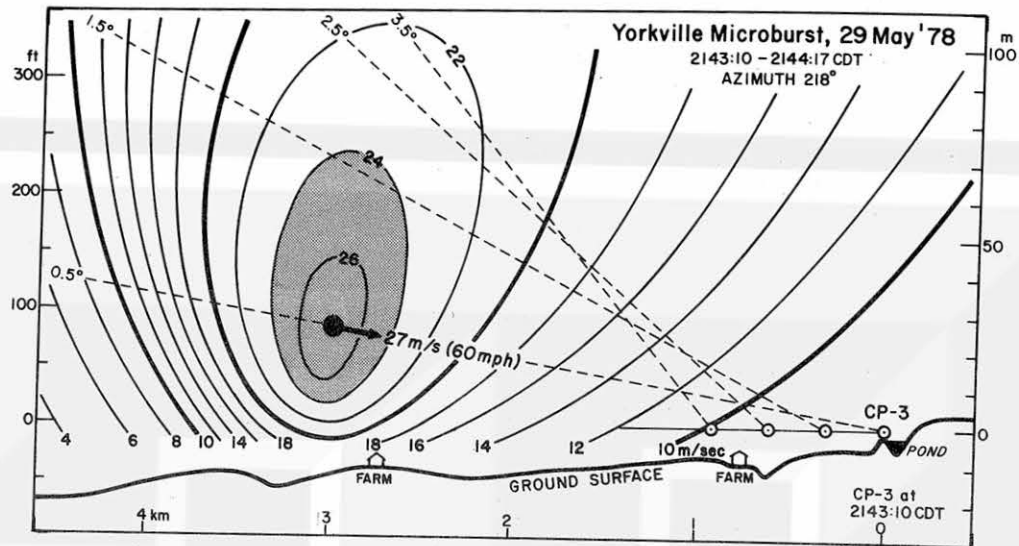
<図6.2> 画面の左から右に移動しているヨークビル・マイクロバーストと、その親雲の RHI 断面画像をコンピューター処理したもの。親雲の下に見える浅い吹き出し風は、速度の重複表示色によって表されている。RDSS の写真はブライアン・スミスによる。

前面の最大風速は、レーダーから 8.5キロメートル (5.3マイル)、反射強度 56 dBZ の軸の直下、高度 2.6キロメートル (8,500 フィート) に位置している。35 dBZの反射強度のエコーの頂上は、わずか6キロメートル (19,500フィート) で、その直径は5キロメートルであった。それは、最初の電光で初めて見えるまで識別することができなかった程、小さな雨域であった。

図 6.3 による水平および垂直面における風速の断面図は、最大風速の風が地上 100メートル(330フィート) 以下にあることを示している。6分後の様子を表したもう 1 枚の断面図は、地上30メートル(100フィート) の高度に最大風速を検知している。



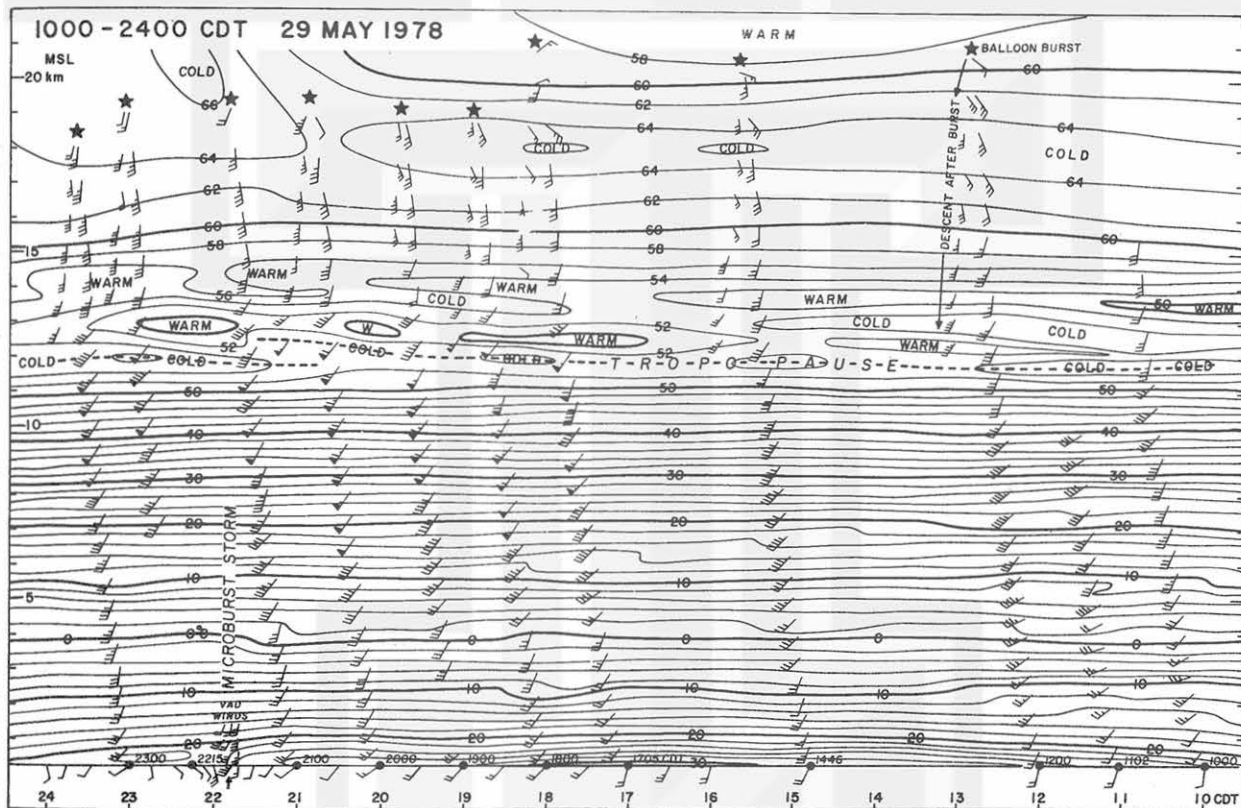
<図 6.3> 21時36分 CDT、CP-3レーダーの西南西8キロメートル (5マイル) の地点で、最大風を吹かせたマイクロバーストの断面図。



<図6.4> 21時43分 CDT、マイクロバーストの最大風が、ヨークビル CP-3 レーダーの南西3キロメートル(2マイル)に接近した際の断面図。

NIMROD の観測中、ヨークビルから1ないし3時間毎にレーウィンゾンデ（観測気球）が上げられ、GMD-1によって追跡された。気球の追跡は上昇中のみならず、約20キロメートル（65,000フィート）の高度で破裂して、降下する際にも行われた。

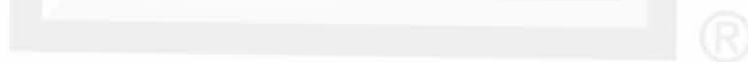
1978年5月29日には、ゾンデはほとんど1時間毎に上げられた。しかしながら、連続観測の結果を慎重に分析しても、特にマイクロバーストを発生させるような雨に関連した気象学的数値の変化は、発見できなかった。高度12キロメートル（39,000フィート）にあったトロポポーズ（亜成層圏）にも大した変化はなく、ただマイクロバーストが発見される約1時間前に古い面が新しい面に置き換えられただけであった。圏界面の温度にも、浅い逆転層が入り込んでいたが、大した変化はなかった。つまり、マイクロバーストを発生させる小規模な雷雨は、1ヶ所から1時間間隔で何度ゾンデを上げて、探知できる可能性は薄いようである。（図6.5）

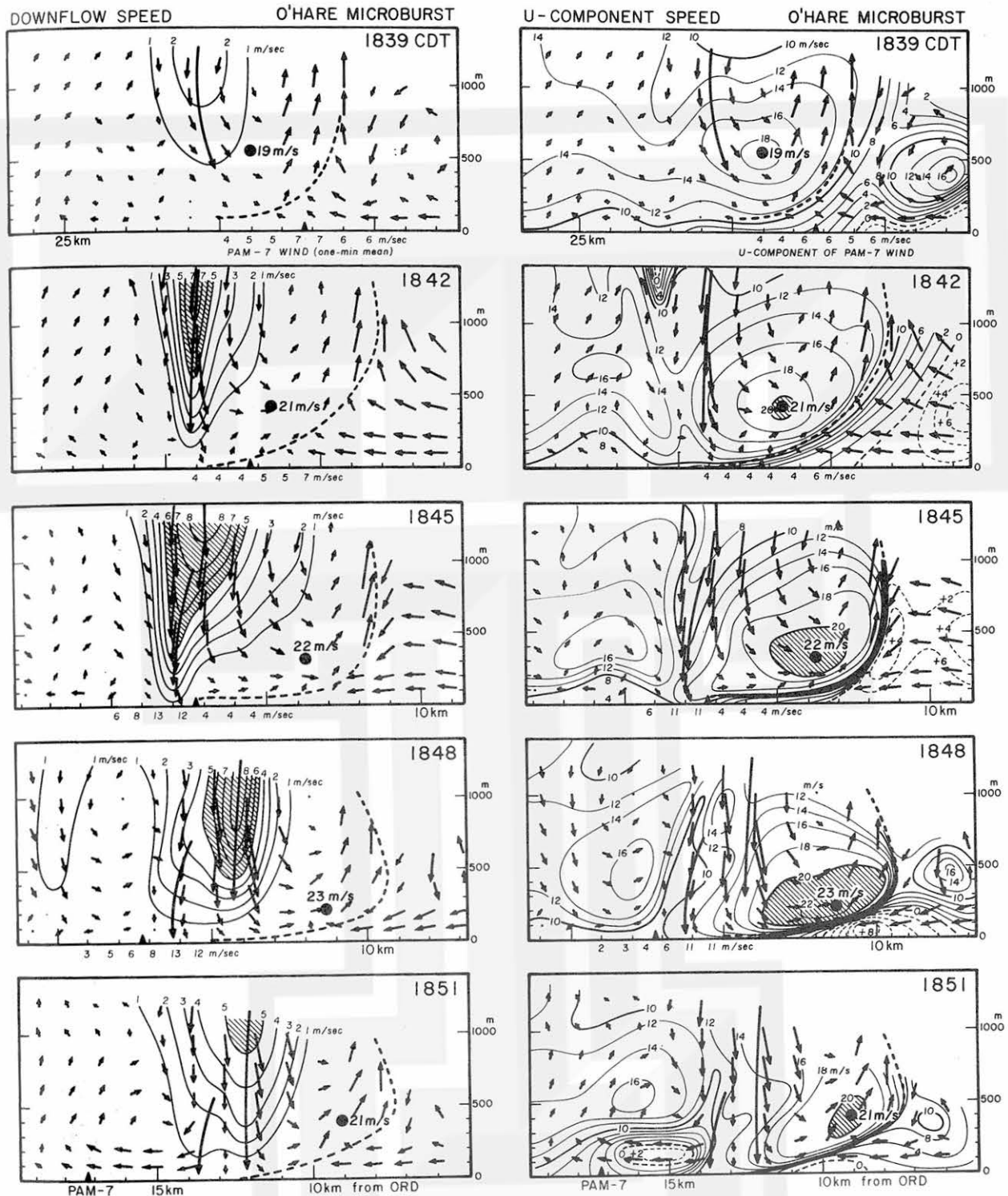


<図6.5> ヨークビル・マイクロバーストが発生した日の、ゾンデ観測による温度と風。11個の気球が放出された。

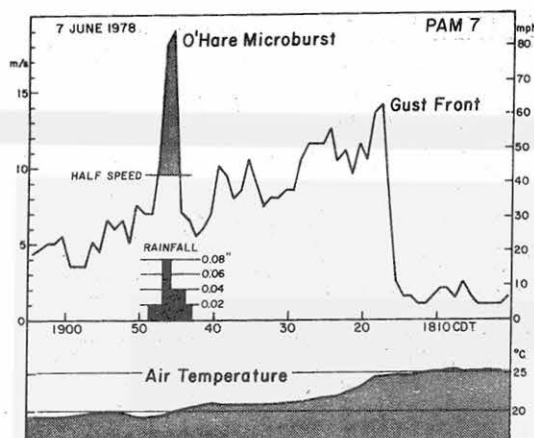
6.2 オヘア・マイクロバースト - 1978年6月7日

19.2メートル/秒 (時速43マイル) の風を吹かせたこのマイクロバーストは、NIMROD の観測中、CP-4 ドップラー・レーダーを設置したオヘア空港の西北西17キロメートル (11マイル) で、PAM7 によって観測された。





<図6.6> オヘア空港に設置された CP-4 ドップラー・レーダーの RHI画像に現われた、オヘア・マイクロバーストの断面図。垂直面の等風速線（左）と水平面の等風速線（右）は、1メートル/秒、2メートル/秒というように1メートル/秒間隔で描いてある。



＜図 6.7＞ 1978年6月7日18時から19時05分 CDT の間、PAM 7 が記録した最大風速、降雨量、温度。14メートル/秒（時速31マイル）の最大風速を伴うガスト・フロントが、18時19分に通過した。その直後、温度は25 °Cから20 °Cに低下した。これは、0.22インチ（5.6 ミリメートル）の降雨を伴った、ウェット・マイクロバーストであった。記録された最大降雨率は、4.8 インチ/時（120 ミリメートル/時）であった。

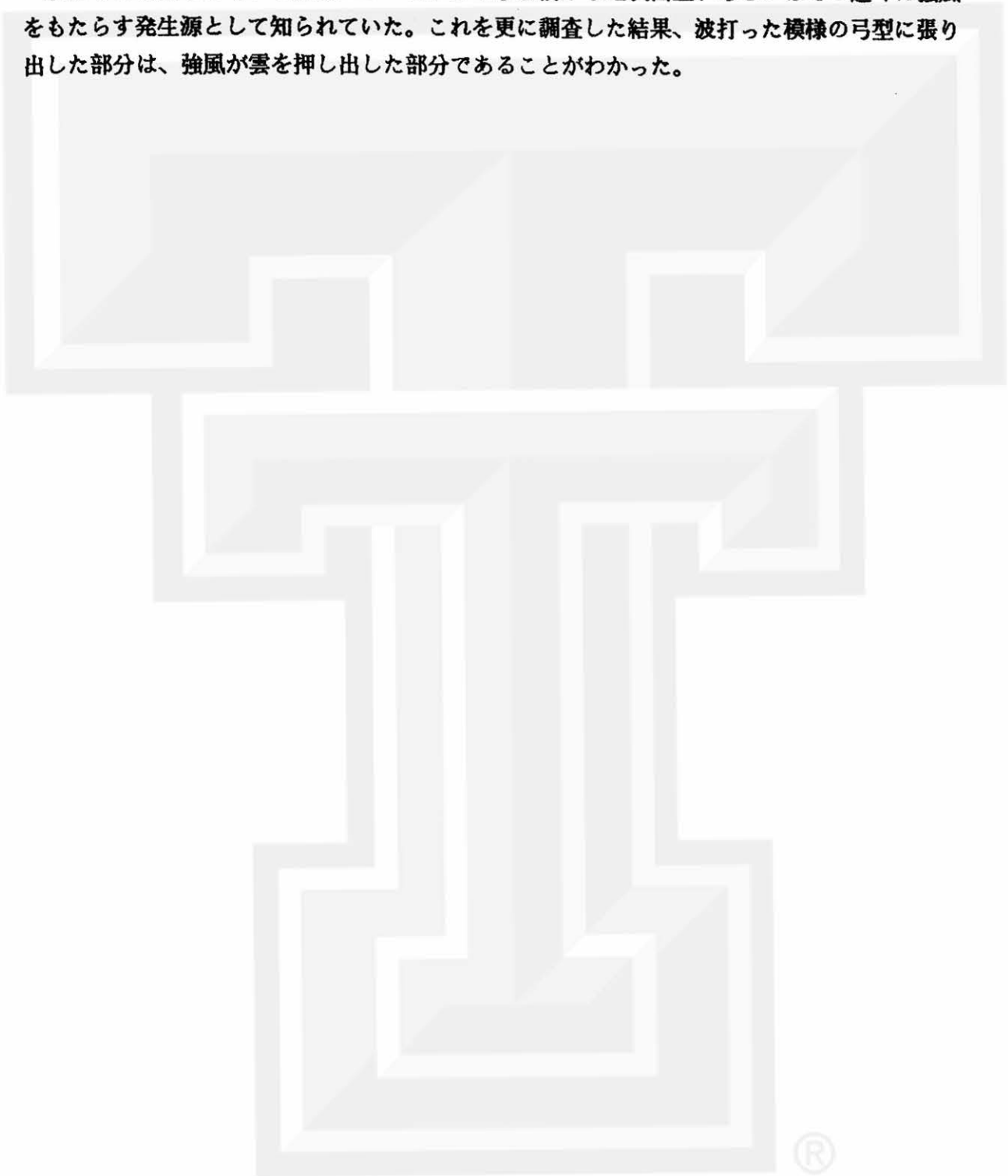
図 6.7 は、CP-4 を PAM 7 に向かった方位角 284 度に向けて観測した、数々の RHI 断面図である。これらの断面図は、PPI 走査をそれぞれ高度角 0.5 度、1.5 度、2.5 度で行って得たデータから作成したものである。

弱い下降気流は、18時39分 CDT から次の 3 分間に強まり、PAM 7 の上空 400メートル（1,000 フィート）で 21メートル/秒（41ノット）の吹き出しを発生させた。そのときの PAM 7 があつた 284° 方向の水平面の風〔U-コンポーネント（右から左への成分）〕は、わずか 4メートル/秒（8ノット）で、観測塔の上を上空のマイクロバーストが通過して行ったことを示している。18時45分にはマイクロバーストの下降気流の端が地面に達し、22メートル/秒（43ノット）の風が上空に留まっているにもかかわらず、地表面では 13メートル/秒（25ノット）U-コンポーネントの風が吹いていたのである。23メートル/秒（45ノット）という上空の最大の吹き出しが、18時48分にオヘア空港に向かって押し寄せているのに対し、地表面では反対方向に秒速 8メートル（16ノット）の風が吹いていた。垂直面における水平風のシア（風の変化率）は、高度 100メートルにつき 15メートル/秒（9ノット/100フィート）であった。これはかなり大きな変化率であるから、この中を通過して着陸したジェット機があったならば、かなりの困難に直面したことであろう。

図 6.7 のように、オヘア・マイクロバーストの風をガスト・フロントの風に重ね合わせてみると、このふたつの風の違いがわかる。まず第 1 に、われわれはこれらの風の特徴を理解し、地上の風力計は必ずしも地表より少し高いところにある危険なマイクロバーストを感知できるとは限らない、ということを認識しなければならない。この事例に示したマイクロバーストは、地上 100メートル（300フィート）の高度にあったのであるが、幸いこれに遭遇した航空機はなかった。

6.3 弓型雷雲マイクロバースト-1978年6月25日

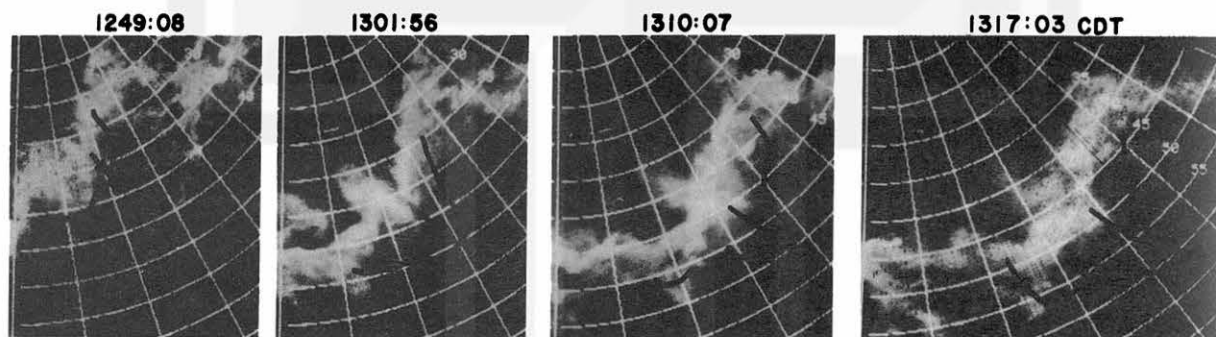
波打った模様をしている線状エコーは、かなり以前から地表面上、あるいはその近くに強風をもたらす発生源として知られていた。これを更に調査した結果、波打った模様の弓型に張り出した部分は、強風が雲を押し出した部分であることがわかった。



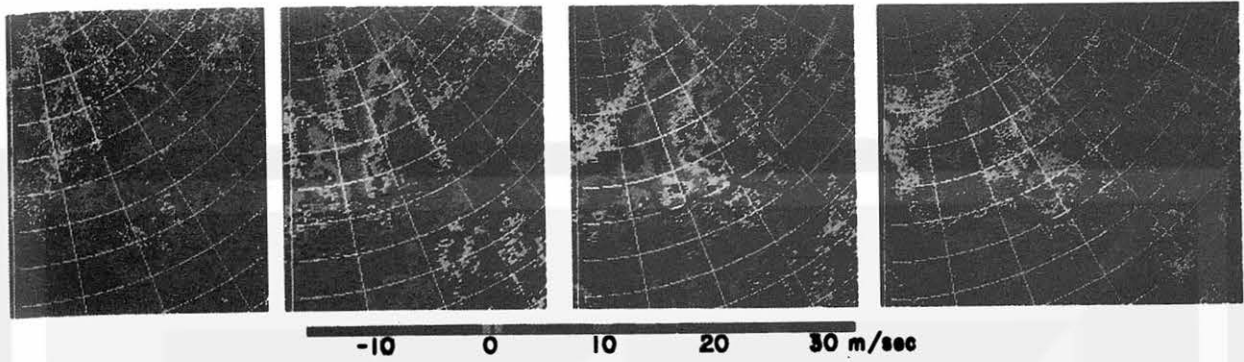
1978年6月25日、CP-3 ドップラー・レーダーの高度角調節モーターが故障した。方位角調節モーターは作動していたので、これだけを使用して、高度角を3度に固定したまま連続 PPI 走査が行われた。幸いにも半身不随のレーダー走査は、ダウンバーストと2個のたつまきを発生させた弓型雷雲が発達する見事な様子を記録する、という結果となったのである。

最初12時49分3秒 CDT、線状のエコーは、エコーが南東にふくらし始めたとき、レーダーから遠ざかる風の袋を発生させた。13時01分56秒、この押し出す風の中心軸に沿って、エコーの隙間が出現した。13時10分には強風の最前部にたつまきが発生し、続いて北西から吹く31メートル/秒（時速69マイル）の気流が発生した。

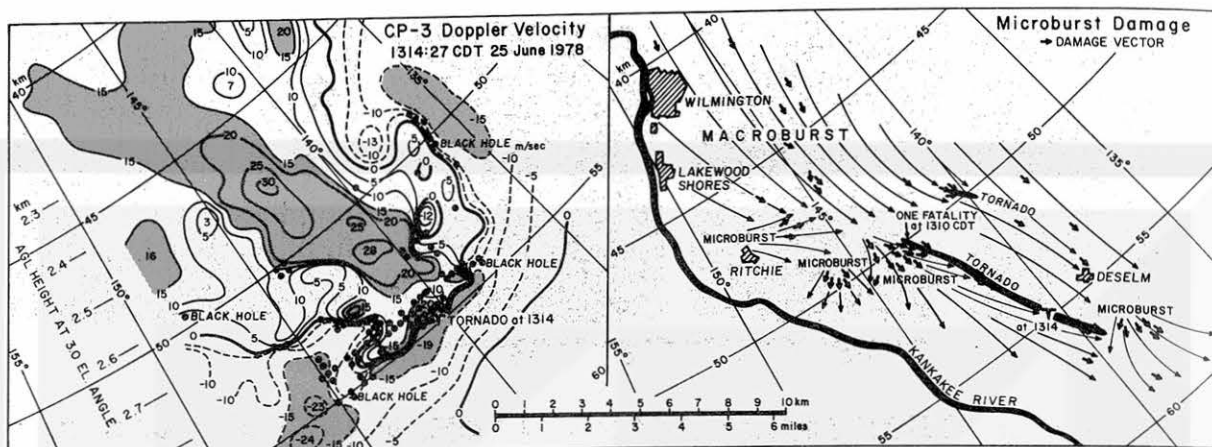
図6.10は、CP-3 高度角3度によるドップラー速度の、等風速線を示している。先端には、生後4分のたつまきが見える。ドップラー速度をゲート毎に調べてみると、CP-3 のコンピューターは速度の変化率が極度に大きくなっている部分では、速度を表示できないことが判明した。このように、ドップラーのスペクトルがあまりにも広範囲となるために速度を表示出来ないゲートは、“ブラック・ホール”と呼び、黒い円で表している。



<図6.8> CP-3 レーダーの南東部分に写し出された、弓型エコーの形成と発達の様子。レーダーのレンジ・マーカー（横に走る同心円）は、1目盛が5キロメートル、方位角線（放射線）は、1目盛が10度である。13時01分56秒 CDT に見える隙間に注意。



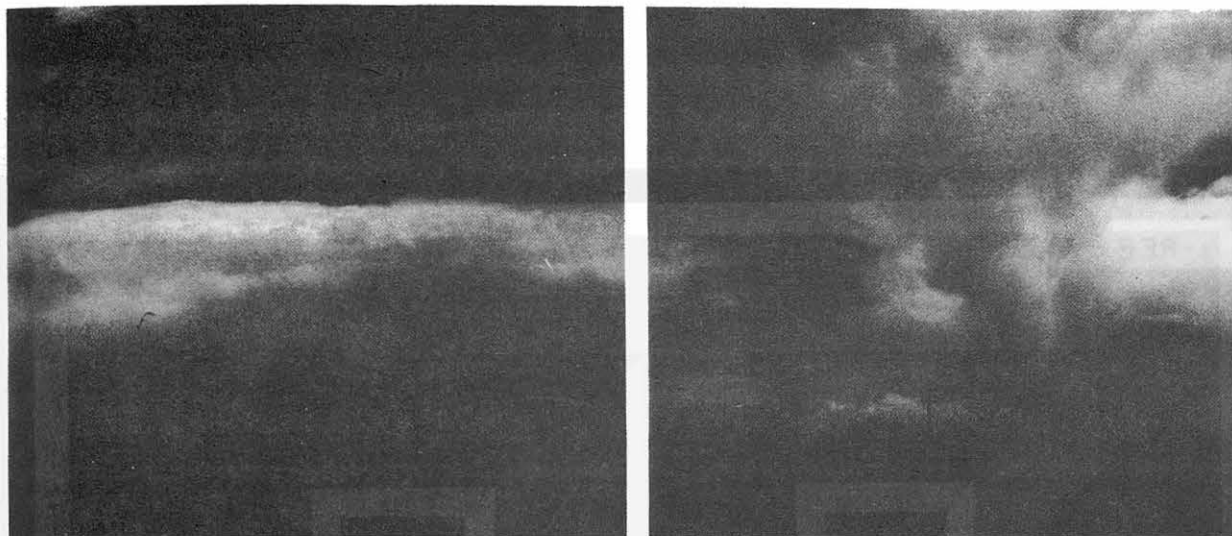
<図6.9> CP-3高度角3度による、ダウンバーストの風。風速は、17メートル/秒（時速38マイル）毎に重複表示した色のついたバーで示されている。最大風速は、28分間のうちに20メートル/秒から32メートル/秒に増加している。



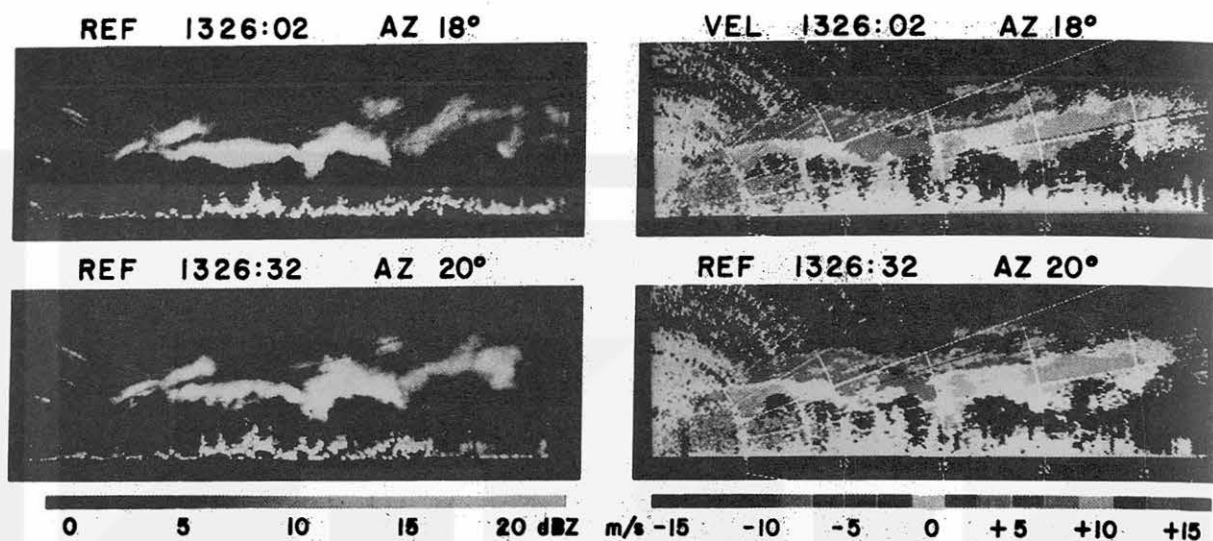
<図6. 10> CP-3 によるドップラー速度 (左) と、ストーム発生後調査したマイクロバーストによる被害。4 個のマイクロバーストと 2 個のたつまきが、マクロバーストの内部に潜んでいた。グレッグ・フォーブス氏の空中調査による。

6.4 フラット・タイヤ・マイクロバーストー1982年5月19日

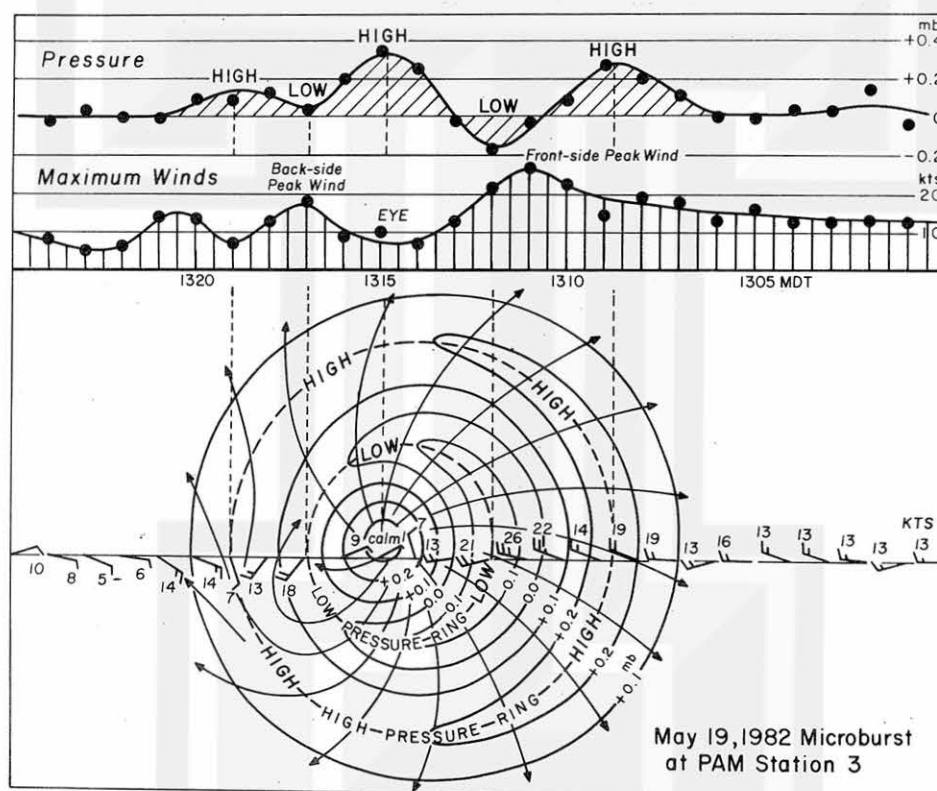
CP-3 レーダー基地に到着する直前に、著者の車のタイヤがパンクした。タイヤ交換をしているとき、たくさんの草が吹き飛ばされて、道路を横切って行った。ドライ・マイクロバーストが車の直上を、レーダー基地目掛けて通過して行ったのである。レーダー基地に到着するとすぐ、著者はレーダーの横に立ってこの雲の写真 (図6. 11) を撮った。このときレーダーは、スリパチ状の、親雲の RHI 断面図 (図6. 12) を探知していた。その後 CP-3 基地にあった PAM3 は、このマイクロバーストの中心の気圧と風を記録した。(図6. 13)



＜図6.11＞ 方位角20度で撮影した、フラット・タイヤ・マイクロバーストの下降気流域。
下に垂れ下がったバーガ（右）は、マイクロバーストの前面に発生した砂じんと、砂旋風を伴
っているのが特徴である。13時20分 MDT、藤田撮影。



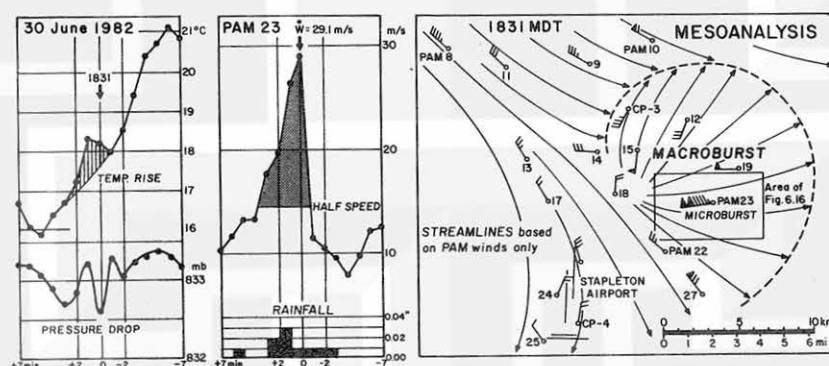
<図 6.12> CP-3 レーダー基地の北北西15キロメートルの地点に、スリバチを伴った親雲の RHI断面図。図の下に、反射率 (左) と速度 (右) のスケールを示した。



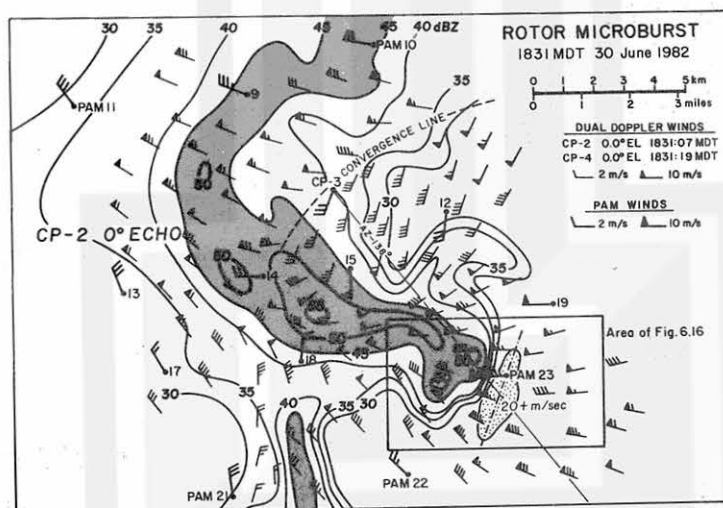
<図 6.13> フラット・タイヤ・マイクロバーストの中心を通る、気圧と風の変化。このマイクロバーストは、著者の車が最適の場所で、最適の時間にパンクしなかったならば、発見されずに終わっていたかもしれない。

6.5 回転円筒型マイクロバースト-1982年6月30日

29.1メートル/秒の最大風速を伴ったこのマイクロバーストの特徴は、活動中の温度上昇と気圧降下である。CP-2/CP-4の2基観測によるドップラー風速は、マイクロバーストがマイクロバーストの下にもぐり込んだことを示している。しかし、ドップラー風速の最大値は21メートル/秒（時速41マイル）で、PAM 23 が記録した最大風速よりも、かなり少なくなっている。これはCP-2レーダーの前方にあった低い丘が障害となって、地表付近の風を測定できなかったためである。（図6.15）他方、CP-3/CP-4による2基観測では、ドップラー風速がPAM 23の南にあった27メートル/秒（時速60マイル）の風の存在を証明しているので、この2台のレーダーが確実に地表面付近の風を測定できたことを示している。（図6.16）

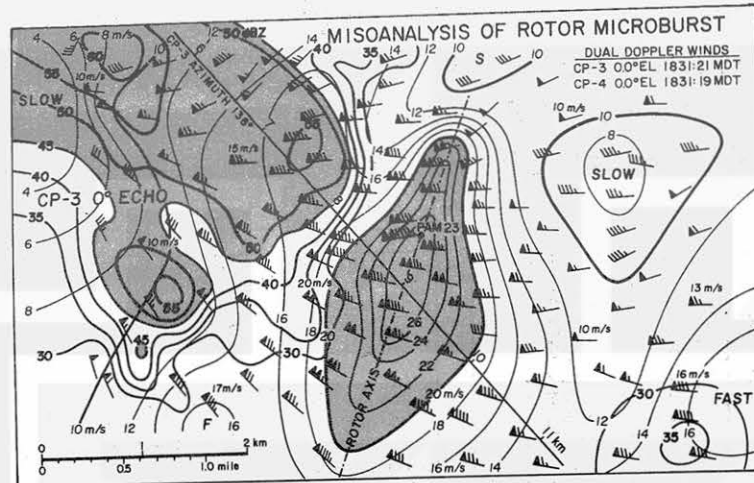


<図6.14> PAM 23 が検知したマイクロバーストの気象要素と、マクロバーストの中に潜んでいるマイクロバーストの風のメソ解析（メソスケール解析）。

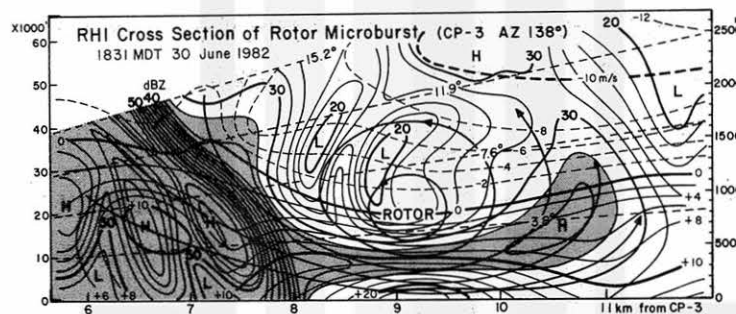


<図6.15> CP-2/CP-4, 2基ドップラー風速で検知された、マイクロバーストの地表付近の気流。丘による障害のため、CP-2は高度角 0.0度で、マイクロバーストの地域の地上風を測定していない。ブライアン・ワラノスカス氏の分析による。

CP-3 方位角 138 度での垂直断面図は、反射率 50 dBZ のエコーの前方にある、回転円筒型マイクロバーストの姿を写している。エコーから降っている雨の雨滴は、マイクロバーストの風によって吹き飛ばされ、雨滴の巻き上がりを形成している。これは、1982 年脇本博士が NIMROD のガストフロントに関する研究で発表したものと類似している。風向が 800 メートル上空でプラスからマイナスに逆転している様子が見られる。(図 6.17)



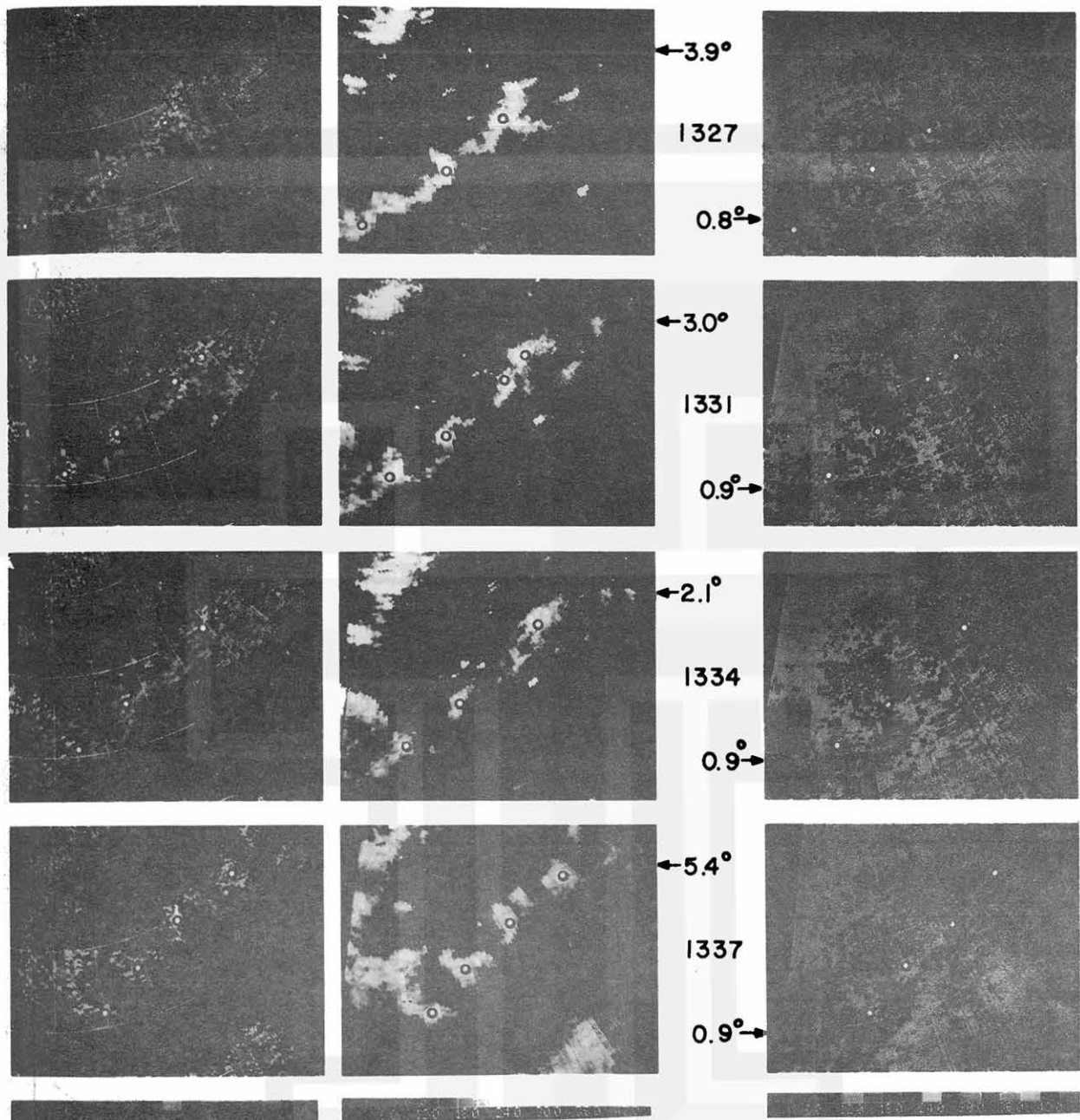
<図 6.16> CP-3/CP-4, 2 基観測によって実現した、PAM 23 マイクロバーストのマイソ解析 (マイソスケール解析)。ブライアン・ワラノスカス氏との共同解析による。



<図 6.17> CP-3 方位角 138 度による、回転円筒型マイクロバーストの断面図。

6.6 ノースプラッテ溪谷マイクロバースト群 — 1982 年 7 月 8 日

コロラド州ノースプラッテ・バレーにおけるマイクロバーストの連続発生は、マイクロバースト・ファミリーに関する重要なデータの数々を提供してくれた。図 6.18 の写真に見るように、4 個のマイクロバーストが南西から北東に延びる谷に沿って行進して行った。そのファミリーのうちのどれもが、反時計方向に回転していた。

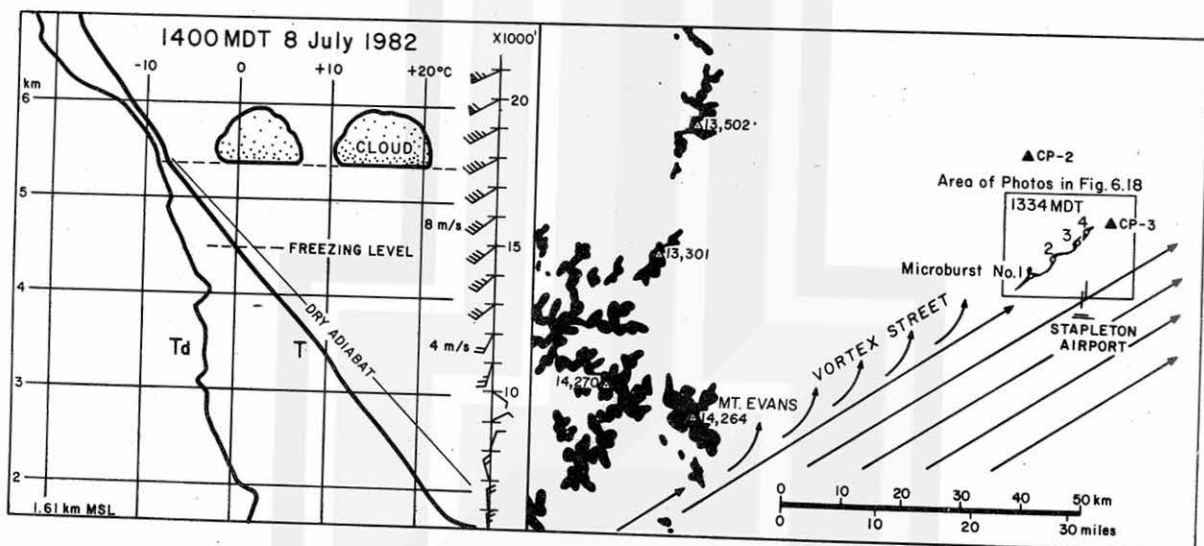


<図6.18> CP-2 ドップラー・レーダーによる、4個のマイクロバーストの写真。写真中の同心円は、10, 15, 20 および 25 キロメートルの距離を表す。色分けした反射率（左）の場は、マイクロバーストが発生させる雲の回転現象を強調するため、白と黒の画像（中央）で再生された。風速画像（右）の場は、NCAR の RDSS の標準色分けで示した。

図6.18におけるマイクロバースト・ファミリーは、No.1, No.2, No.3, No.4の4個から構成されていた。13時26分 MDT、写真の南西部にある最も古いマイクロバースト (No.1) は、消滅期にあった。その接近速度 (緑からブルー) は、次の10分間以内にほぼゼロに減速した。

これらのマイクロバーストのどれもが、10分間足らずの内に成長し衰弱するという、非常に急速な過程を経たことは、注目すべきことである。これらが形成される段階での親雲、はマイソスケールの波動であり、それは丁度小型の寒帯前線波動 (polar-frontal wave) のようなものであった。マイクロバーストが老朽化してくると、これらの波動は直径2から4キロメートルの、マイソサイクロンに様変わりしていた。

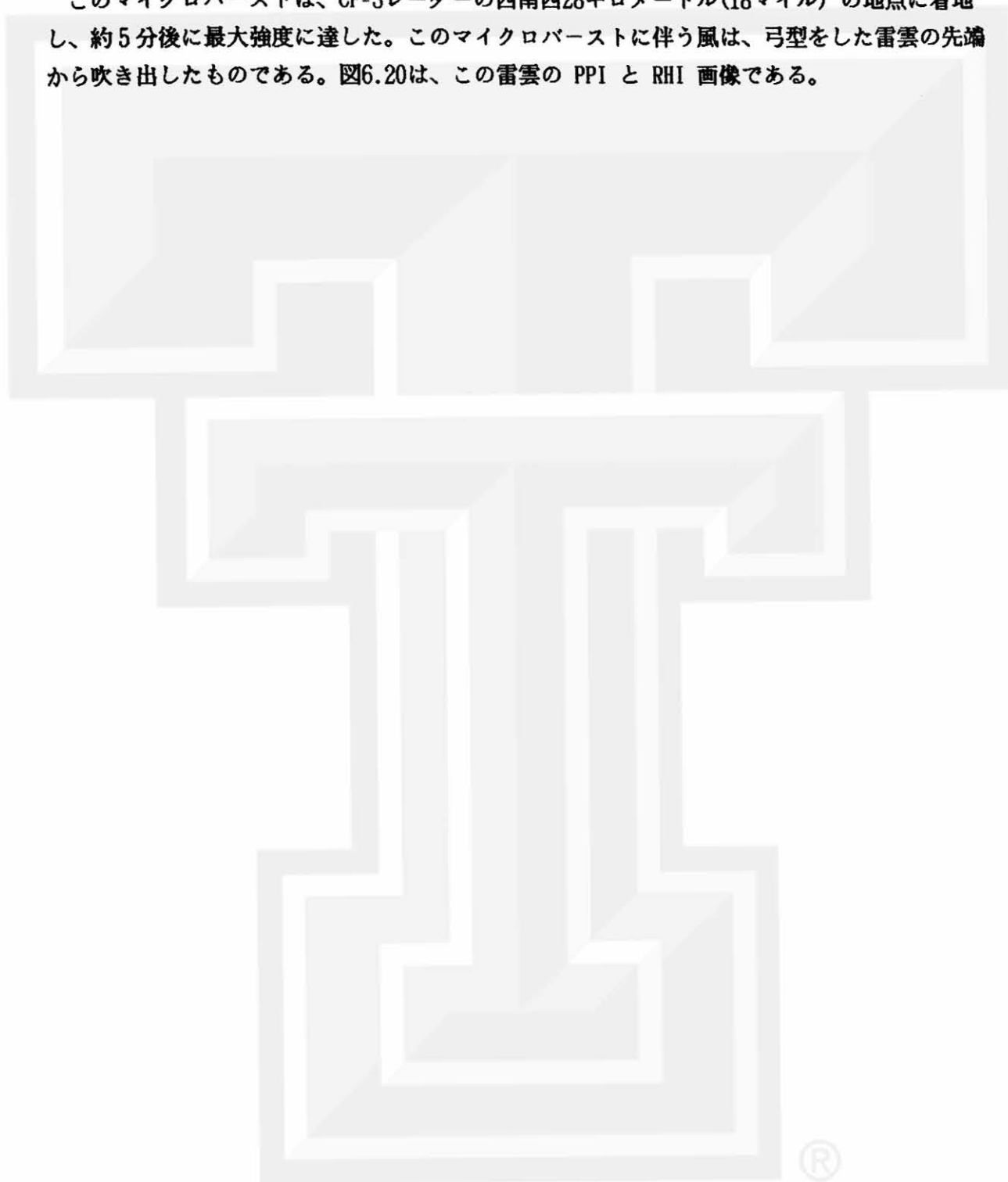
14時にデンバーで実施したゾンデ観測 (図6.19) を見ると、地上 3.7キロメートル (12,100フィート) まで乾燥断熱層が延びている。雲層は、飽和点付近の露点温度でわかるように、5.3 から 5.9キロメートル (17,400から19,300フィート) の高度に位置している。マイクロバースト・ファミリーの、ロッキー山脈の高峰との相対的位置関係からすると、標高 14,264 フィートのエバンズ山の山かげでつくられた速度の異なった気流が、ノースプラッテ谷に流れ込んだ可能性を示唆している。前述のマイソスケールの波動の方位は、雲層のある上空の風と偶然にも一致するのである。雲底は、エバンズ山の頂上から 3,100フィート (900メートル) 高いところに位置しているが、山の風下で発生し雲底に流入する風は、渦度を上層に運ぶので、一連のマイソサイクロンの列を形成する。

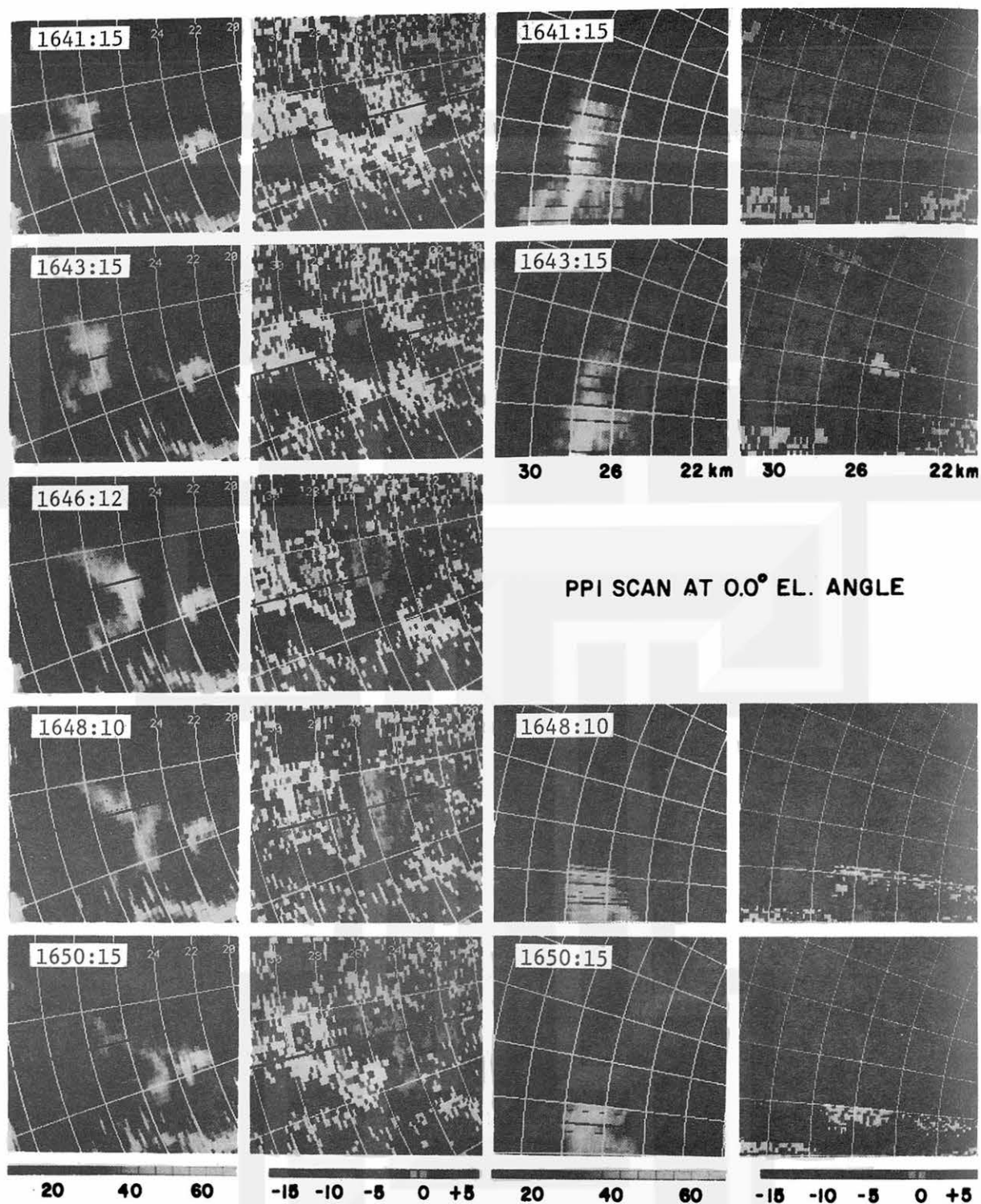


<図6.19> 14時のデンバーにおけるゾンデ観測と、エバンズ山の風下に発生が予想される渦の例。

6.7 弓型雷雲マイクロバースト - 1982年7月14日

このマイクロバーストは、CP-3レーダーの西南西28キロメートル(18マイル)の地点に着地し、約5分後に最大強度に達した。このマイクロバーストに伴う風は、弓型をした雷雲の先端から吹き出したものである。図6.20は、この雷雲の PPI と RHI 画像である。

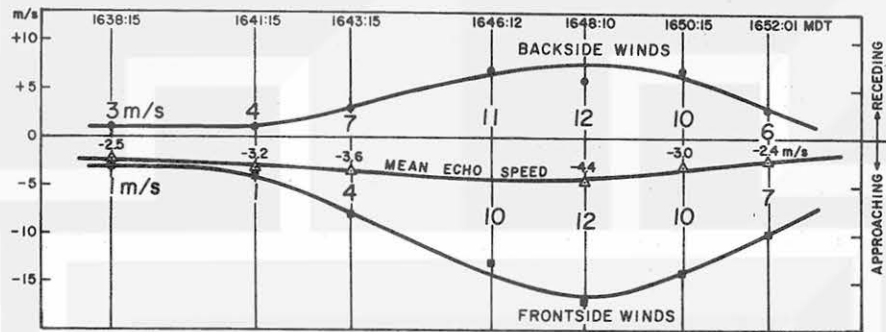




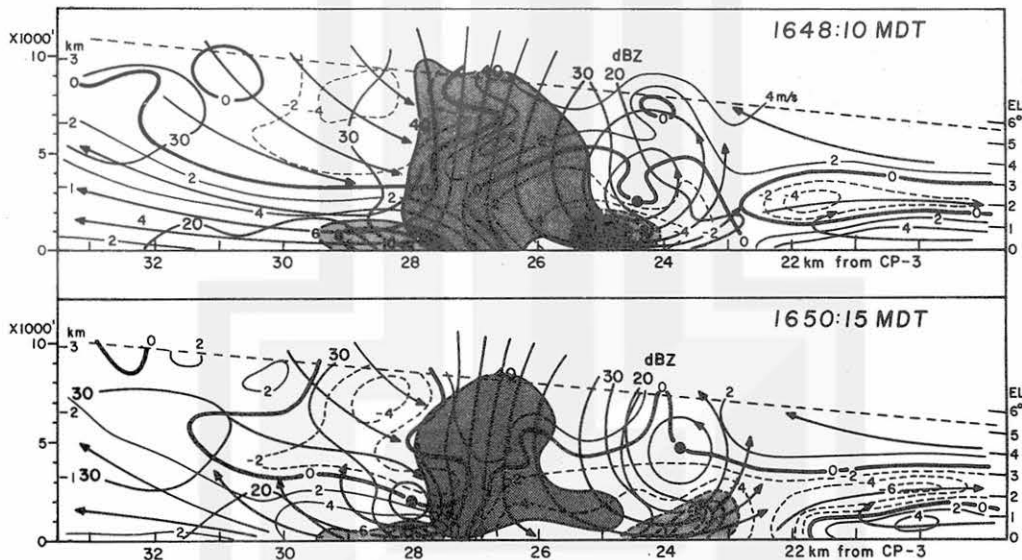
<図 6.20> 1982年 7月14日、マイクロバーストを発生させた弓型雷雲の PPI (左)と RHI (右) 画像。RHI 断面図は NCAR の RDSS を使用してブライアン・スミス氏が作成。

時間の関数としての対エコー速度を決定するため、方位角256度での RHI 画像面上で、40 dBZ 以上のエコーの区域内のドップラー風速の平均値を計算し、それを対地ドップラー速度から引いた。その結果は、図 6.21 が明確に示すように、マイクロバーストから吹き出す風は CP-3 レーダーに向かうものも、遠ざかるものも均一に吹き出していることがわかった。

図 6.22 の断面図に描いた対エコー速度は、水平軸を持つ渦を伴った強い吹き出し（薄い赤）の存在を証明している。20 から 40 dBZ の強度で反射しているエコーが CP-3 に向かって広がり、吹き出しの中に突入しているのが見られる。赤の直線はプラス（レーダーから遠ざかる）の等風速線で、点線はマイナスの風速である。



<図 6.21> 弓型雷雲から発生した、マイクロバーストの前面（ブルー）と後面（赤）の風。図中の速度は、対エコー速度。ブライアン・スミス氏と共同解析。

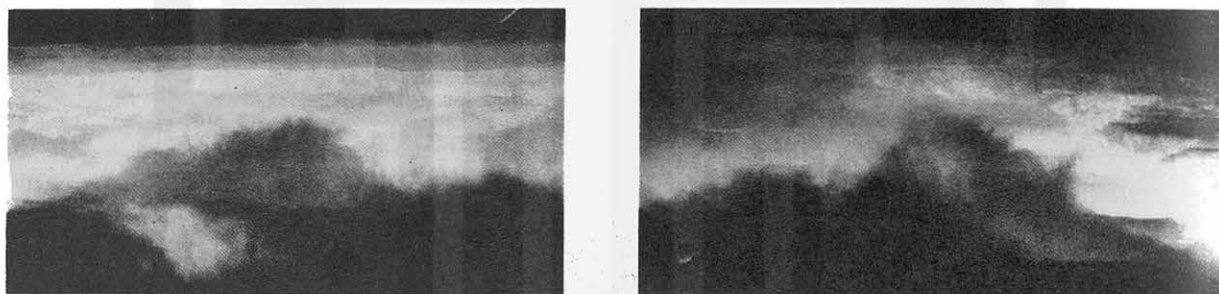


<図 6.22> 16時48分10秒と16時50分15秒 MDT 時の対エコー速度。40 dBZ 以上の反射率は、青色で示されている。ブライアン・スミス氏と共同解析。

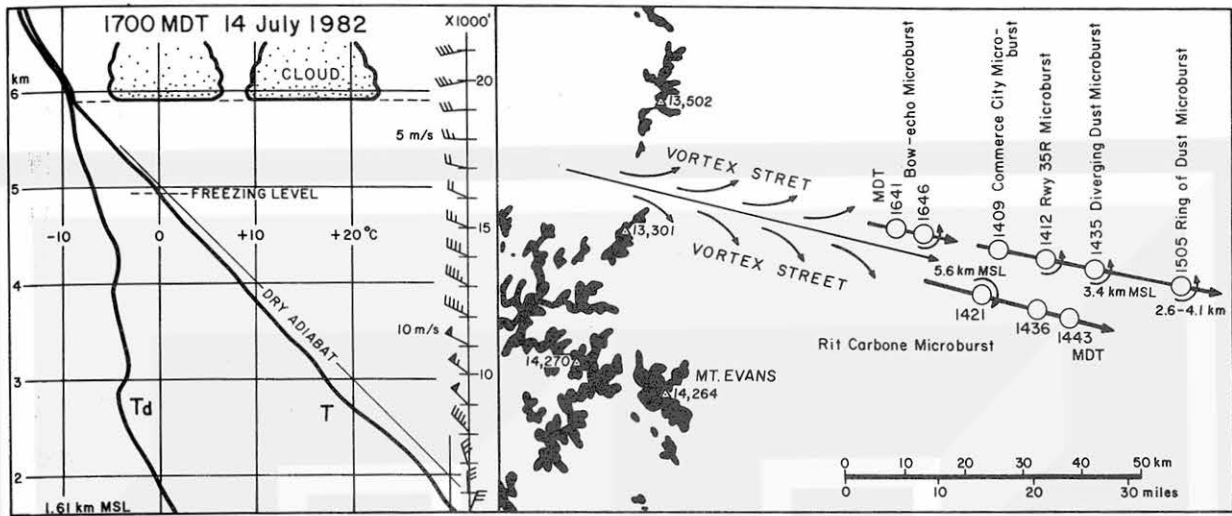
6.8 デンバー地区マイクロバースト群 - 1982年7月14日

キングエアー機に乗って、著者は約1時間マイソサイクロンに伴う雲を観測し、マイクロバーストの形成過程を目撃した。(図6.23) 最初のマイクロバーストは、PAM 16があったカマース・シティに降下し、14時9分 MDT に18.9メートル/秒(時速42マイル)の最大瞬間風速を記録した。2番目は、滑走路 35R の上に降下したもので、すでに図1.4で紹介した。更に発生した2個については、後にふれることにする。

これら4個のマイクロバーストと、図6.20の弓型雷雲マイクロバーストは、ロッキー山脈の比較的低い部分の風下側に、ほぼ一直線をなして並んでいることがわかった。弓型雷雲とマイソサイクロンの両方が反時計まわりなのに、リット・カーボン・マイクロバースト(後述)は、標高 5.6キロメートル(18,400フィート)の上空で、時計まわりの回転を伴っていた。図6.24の上層風は、ロッキー山脈の低部から降りてくる風があったことを示唆している。この流れが、左側に反時計方向の渦の列を、反対側には時計方向の渦の列を形成する可能性がある。



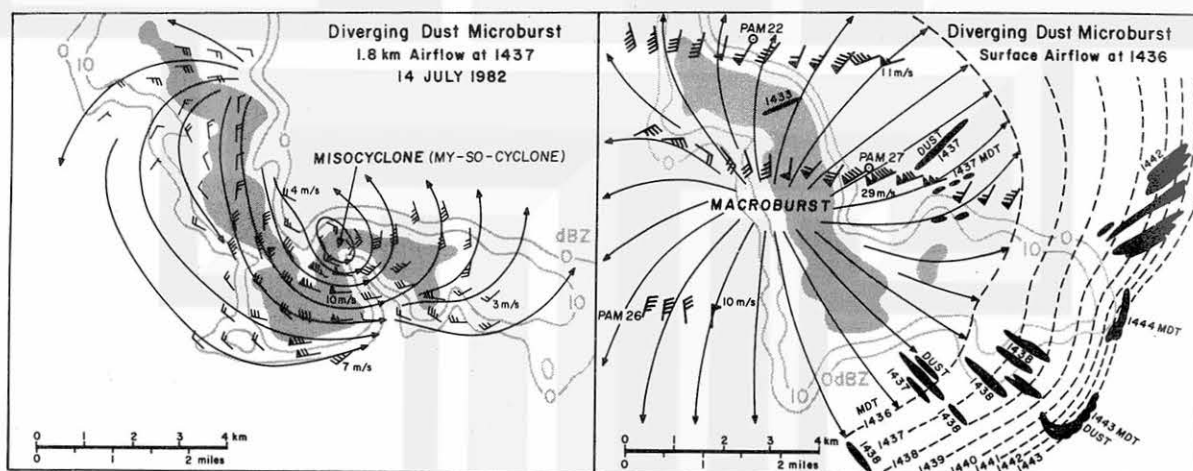
<図6.23> カマース・シティ・マイクロバーストが着地した14時9分6秒時のマイソサイクロンに伴う雲(左)と、14時33分19秒秒じん発散マイクロバーストが発生する直前の雲。藤田撮影。



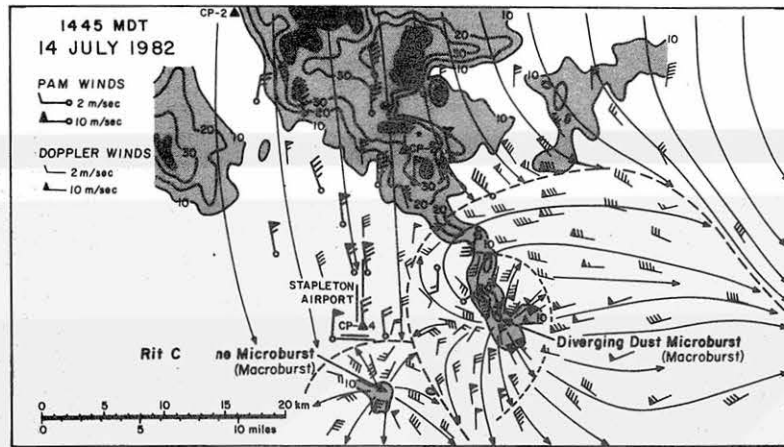
<図6.24> 7月14日デンバー地区マイクロバースト群を発生させた、マイソスケールの渦の形成を示す略図。エリック・ピーターソン氏と共同解析。

ステープルトン東部における砂じん発散マイクロバースト

図6.23に示したマイソサイクロンの写真を14時33分9秒に撮影した直後、砂じん発散マイクロバーストが発生した。ダストフロント（砂じんを伴った前線）の等時線〔フロントの位置を同じ時間毎に結んだ線〕は、キングエアー機から空中撮影した砂じんの写真を基に決定された。ダストフロントの後面には、発散している風の吹き出し（マイソからメソスケールの）があった。CP-3/CP-4の2基観測によるドップラー風速は、地上1.8メートル上空に、マイソサイクロンの回転を示している。図6.26の風とエコーとの関係は、大型のエコーはメソスケールの強風域をつくり、小型のエコーのいくつかがマイクロバーストの発生源となっていることを如実に示している。そして風を探知するためには、ドップラー・レーダーが必要であることも同時に意味している。



＜図6.25＞ マイクロバーストの規模に広がった、砂じん発散マイクロバースト周辺のダストフロントの等時線。地上1.8キロメートル(5,900フィート)では、マイソサイクロンの回転が顕著である。

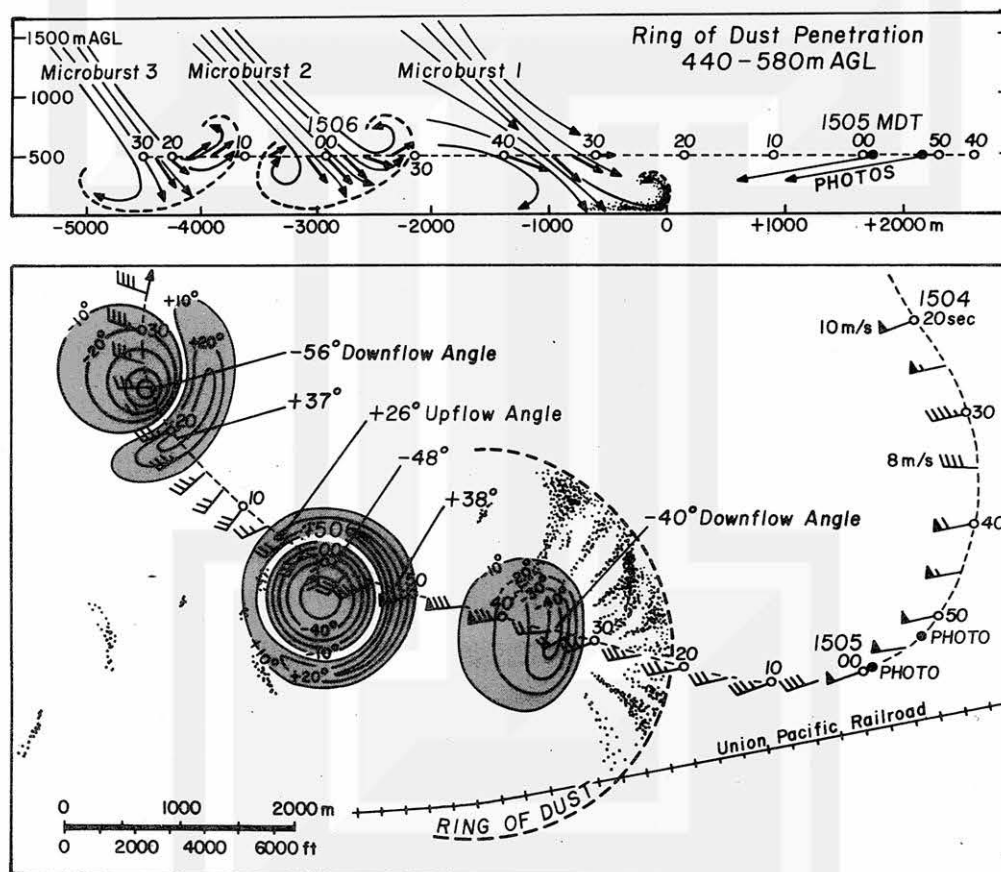


<図6.26> 1982年7月14日、14時15分 MDT に発生した3個の吹き出し風系。小さなエコーがマイクロバーストの発生源になっているのに対し、大型で強いエコーは、大型でメソスケールの風系を形成しているのがわかる。

コロラド州ワトキンス付近での環状砂じんマイクロバースト



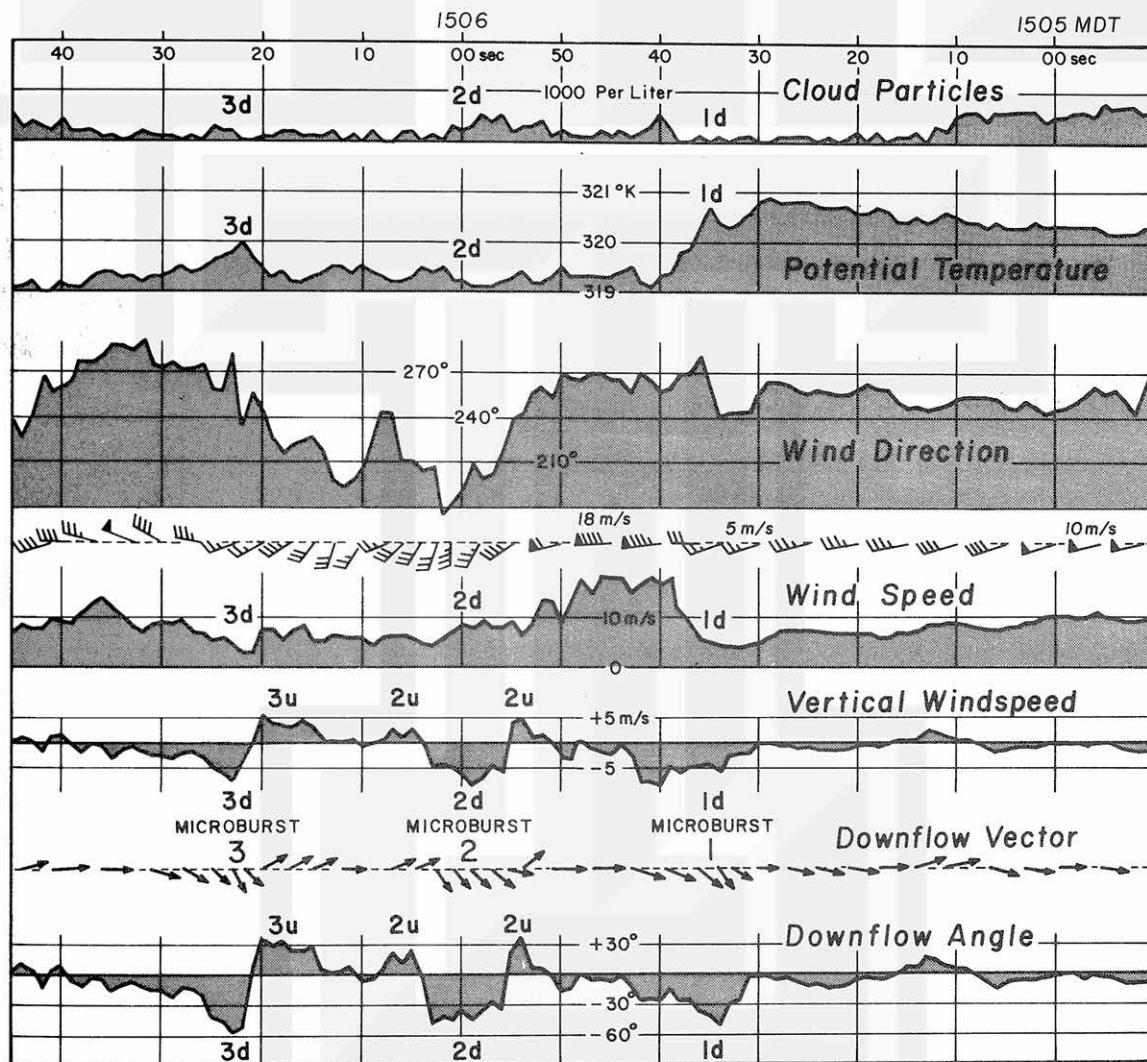
＜図 6.27＞ ステープルトン空港の東27キロメートル（17マイル）に発生したマイクロバーストの吹き出しによってできた砂じんの環。地上 500メートルのキングエア―機から15時3分53秒 MDT、藤田が撮影。



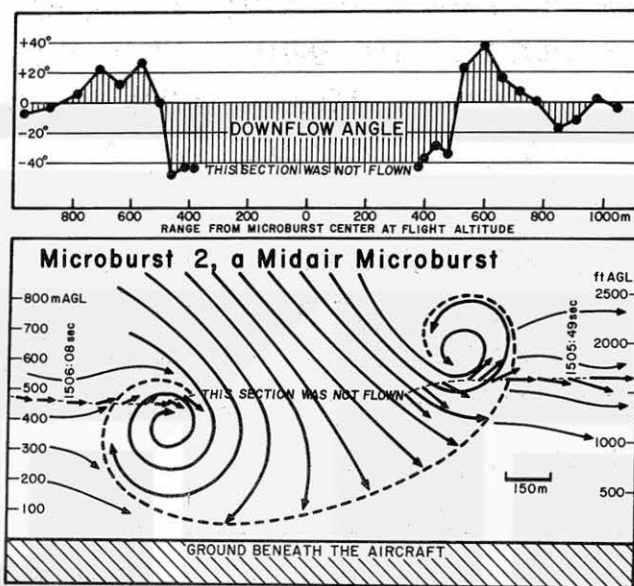
＜図 6.28＞ キングエア―機で横断した3個のマイクロバーストと、航空機の航跡との関係図。

1982年7月14日の調査飛行中、著者はワトキンスの近くで、現状の砂じんを目撃したのである。その写真(図6.27)を撮影するや否や、著者は吹き出し風の起こっている場所の上空を、安全な高度 500メートル(1,800フィート)で飛行した。航空機はそこで雲の粒子を採取したが、雨滴は全然発見することはできなかった。最初に横断したマイクロバーストの下降気流の中で、温度は2 °C 下降した。

航空機の各位置で測定した水平および垂直方向の風を使って下降気流の角度を計算してみると、それは-60度(下降流)から+30度(上昇流)へと著しく変化していた。しかし、地表面に達したNo.1マイクロバーストの内部では、上昇気流は測定されなかった。ところが、他のふたつは、大きな気流上昇角を伴っていたのである。(図6.29) No.2 マイクロバーストの気流の拡大図を、図6.30に示した。



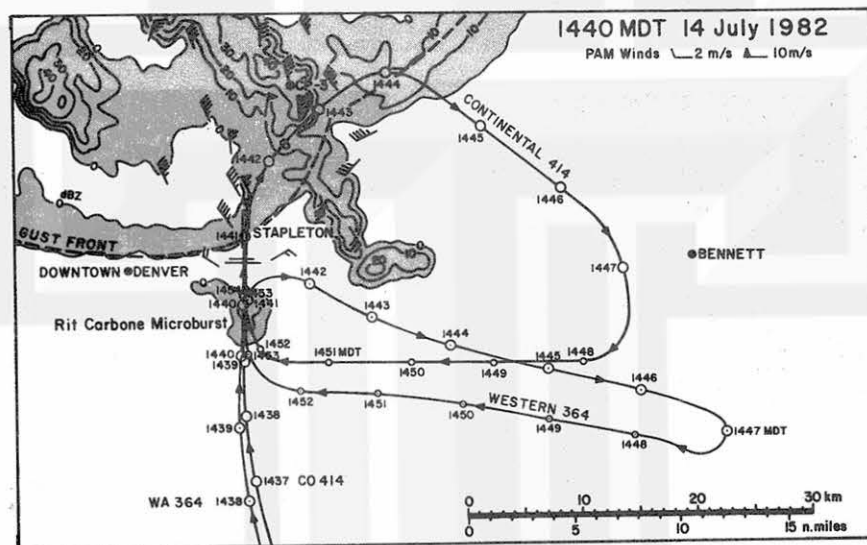
<図6.29> 3個のマイクロバーストを横断中、キングエアー機から1秒間隔で測定した気象要素。下降流のベクトルは、垂直面内での風を示す。



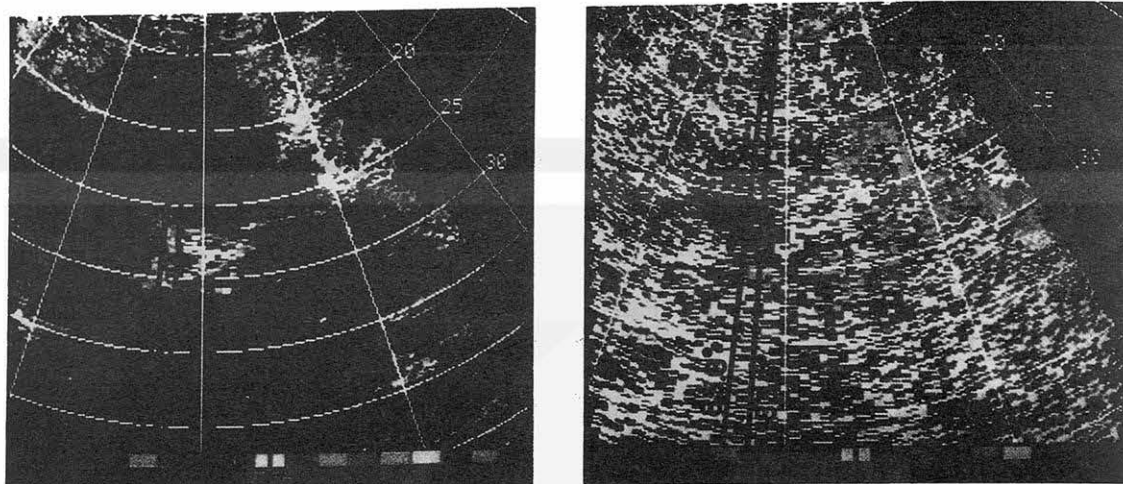
<図6.30> 図6.29で示した、15時5分47秒から15時6分10秒 MDT 間の空中観測データの拡大図。航空機は下降気流の中心を飛行しなかったが、中心に最も接近したのは中心の北北西 400メートル(1,300フィート)の地点であった。(図6.29) この図の尺度は、No.2マイクロバーストの下降流の中心からの距離である。このマイクロバーストは、地上に砂嵐を発生させない空中のマイクロバーストであった。下降流の角度の変化は、航空機がロール状の渦の中心付近を横断したことを示している。

リット・カーボン・マイクロバースト

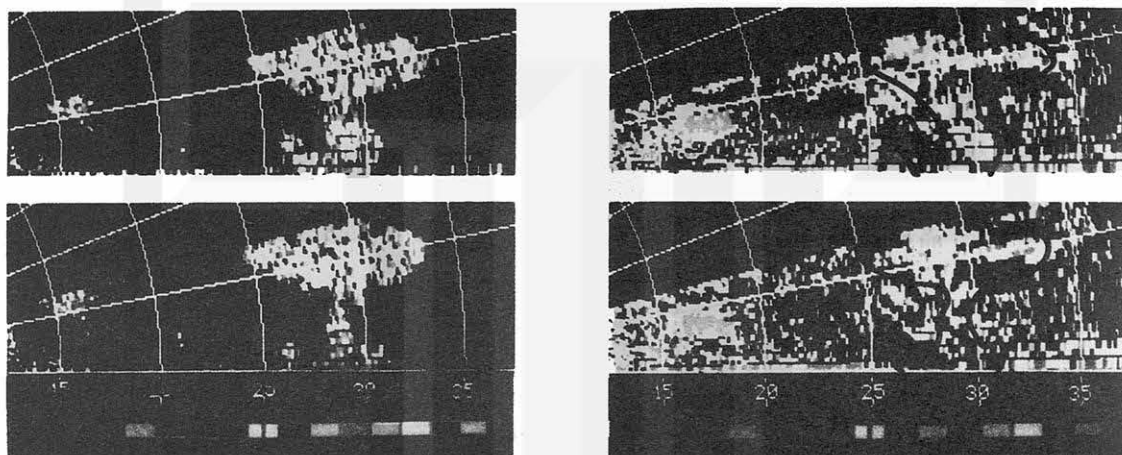
このマイクロバーストは、12時45分 MDT にデンバーの市街地上を通過し、ステイプルトン空港の滑走路 35L/R両方の進入経路に向かって移動した。コンチネンタル航空 414便は、14時40分00秒に着陸の許可を受けた。その数秒後、航空機はマイクロバーストによるウィンド・シアアの中で、急激に沈下を始めた。パイロットはエンジンを最大出力にまで加速したが、機は沈み続けた。直ちに着陸復行（着陸を中止して上昇する操作）が行われ、航空機は無事 8,000 フィート（地上約2,500 フィート）の高度へ上昇することができた。NCAR のリット・カーボン氏は、コンチネンタル航空 414便の後ろを飛行していたウェスタン航空 364便に搭乗して、恐怖を味わった。同じ気象学者としての同氏の忘れられない経験を知らしめるため、このマイクロバーストは「リット・カーボン・マイクロバースト」と名付けられた。（図6.31）



<図6.31> リット・カーボン・マイクロバーストの中を飛行中、着陸復行したコンチネンタル航空 414便と、ウェスタン航空 364便の飛行航跡図。



<図 6.32> 14時21分29秒撮影したリット・カーボン・マイクロバーストの反射率 (左) と速度 (右)。CP-3 による PPI 走査は高度角 1.4度による。



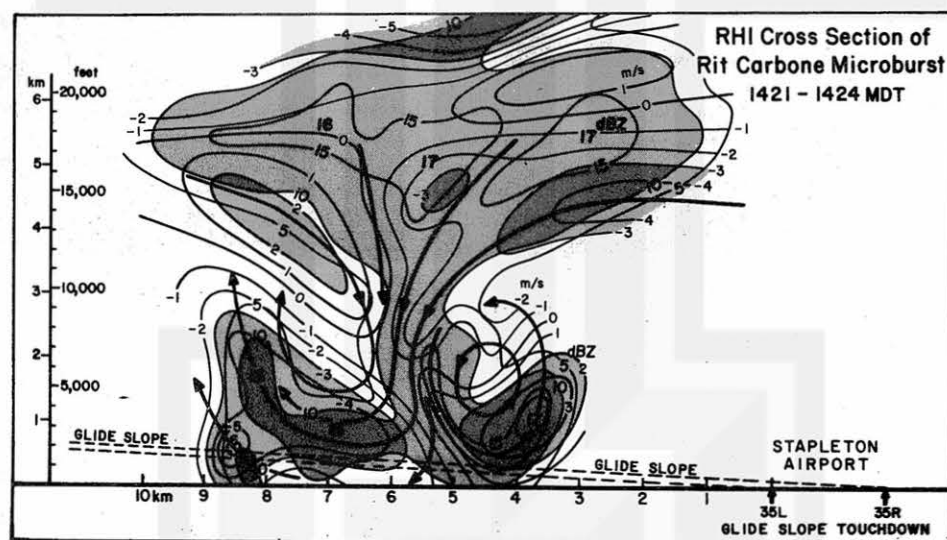
<図 6.33> 多重 PPI走査のデーターを複合して作成された、2 つの CP-3 方位角における、RHI 走査図。ブライアン・スミス氏による NCAR の RDSS 画像。

ウエスタン航空 364便は、コンチネンタル航空 414便の後方約1分にいた。同機もまた14時41分に急激な沈下に遭遇し、着陸復行を余儀なくされた。機は 080度の方位へ急旋回し、8,000ftが、無事着陸した。リパブリック航空 760便とウエスタン航空46便は、13ないし20ノットの追い風を受けながらも定時に着陸した。

リット・カーボン・マイクロバーストの親雲はタイプ "C" のキノコ雲であった。CP-2 による反射率と速度は、それは小さな弱い雷雲であることを示している。(図6.32) NCAR の RDSS が再生した2つの RHI 走査図は、下降軸と地表面近くでの吹き出しを持つキノコ雲の形状をハッキリと見せている。(図6.33)

<表 6.2> 1982年7月14日、ステイプルトン空港の滑走路35の進入経路で、リット・カーボン・マイクロバーストに遭遇した7機のウインド・シアーの状況。時間は MDT。

航空機	着陸許可時刻	着陸、着陸復行およびその他の状況
42 W	1437:10	1438に35L に着陸、ウインド・シアーの報告なし。
コンチネンタル航空 414 便	1440:00	1440着陸復行、強度な沈下、最大出力でも沈下。 滑走路の方位へ上昇。1454、35R に着陸。
ウエスタン航空 364 便	-----	1441、着陸復行。強度な沈下、方位080度へ旋回し 8000フィートに上昇。1455、35R に着陸。
コンチネンタル航空 458 便	1440:55	1442、35L に着陸。600フィートで20ノット、それ 以下の高度で30 ノットの追い風に遭遇。
リパブリック航空 760 便	1440:00	1444、35R に着陸。依然として沈下と13ノットの速 度減少に遭遇。
ウエスタン航空 46便	1440:05	1444、35L に着陸。プラス30、マイナス20ノットの 速度変化(シアー)に遭遇。
ASP 434便	1440:34	1445、35L に着陸。ウインド・シアーの報告なし。



<図 6.34> 14時21分から1424分 MDT 時のリット・カーボン・マイクロバーストを、コンチネンタル航空 414便とウエスタン航空 364 便が進入を中止した、14時40分の位置に置いた図。

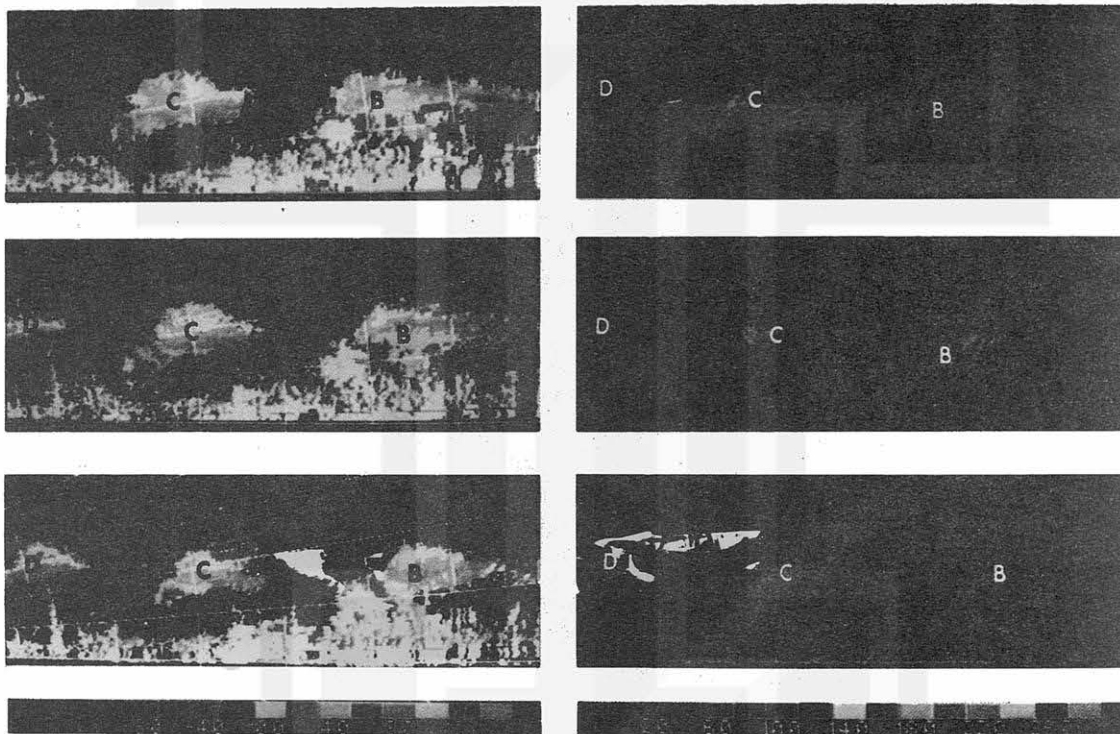
コンチネンタル航空414便とウエスタン航空 364便が着陸した時点の、高高度までの総観走査図は入手できなかった。しかし、これより16から19分以前の総観図を14時40分の位置に置いてみた。だが、CP-2レーダーから30キロメートルも離れていたのと、丘が障害となっていたため、地表面付近の風速は測定できなかった。従って、進入経路付近の高度では、もっと強い追い風が吹いていたと想像される。

幸いにも、追い風は滑走路末端から4キロメートル（2海里）南にあった。もしこの追い風があと2キロメートル（1海里）滑走路に接近していたならば、進入経路における対地高度が100メートル（300フィート）になるから、着陸復行した航空機のうちの1機は大変な目に遭っていたことであろう。

6.9 大アリクイ型マイクロバースト ——— 1982年7月16日

7月17日のデンバーは、ステープルトン空港の50マイル以内で雷雲の活動があった以外は、割り合い静かな日であった。著者はこの日、高い雲底をもつ積雲からも下降気流が発生するはずであるという研究を押し進めるため、午後遅くCP-3レーダー（図4.7、JAWS観測網参照）の東、アイアンデイル道路上空の調査飛行を行った。CP-2、CP-4の両レーダーは、この地域のPPI走査を行い、CP-3は同じ部分のRHI走査を行った。このとき、ブライアン・スミス氏はCP-3基地から東に向き、写真を撮り続けていた。

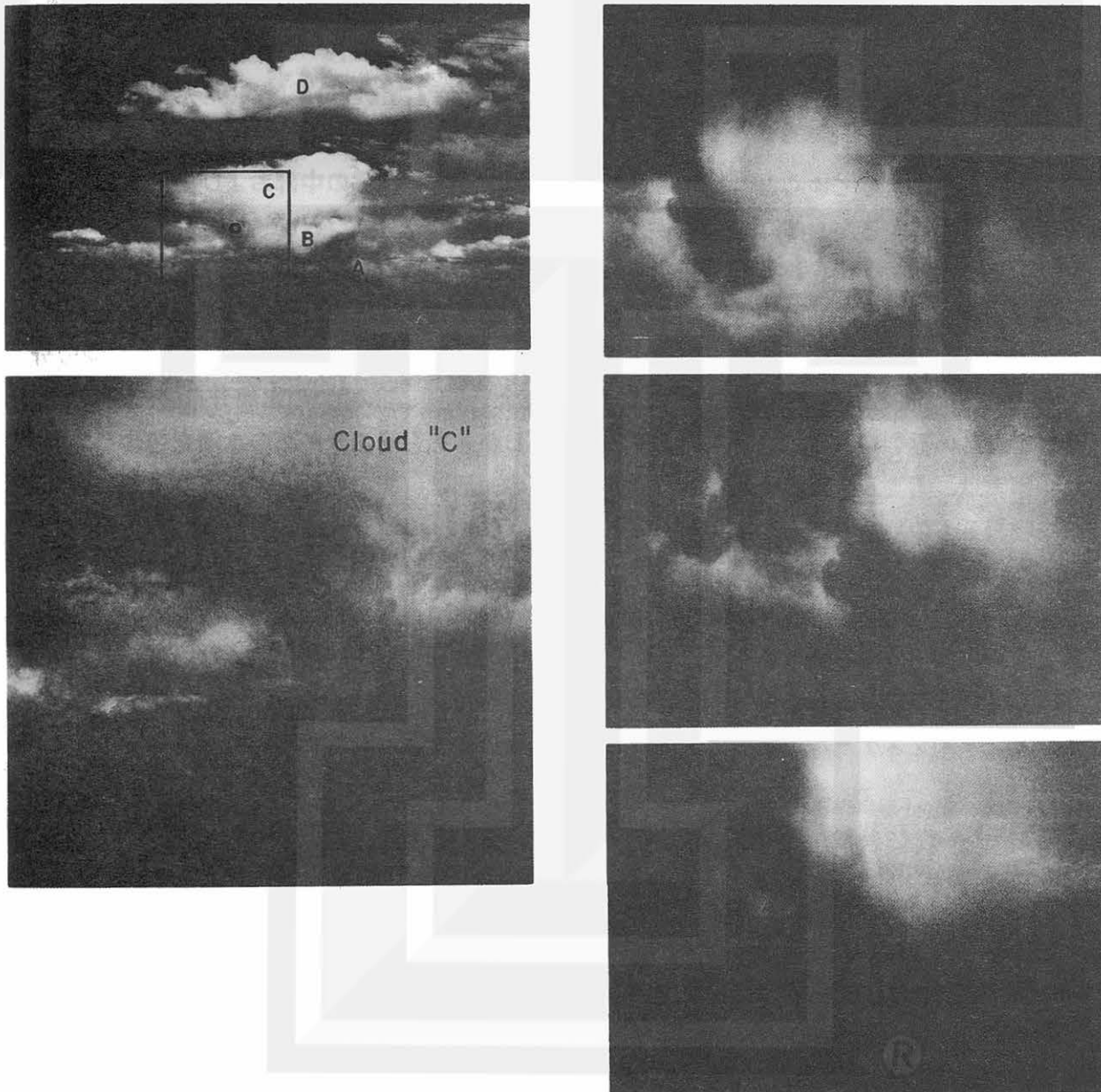
CP-3の東方約20キロメートル（13マイル）の地点では、4個の高い雲底をもつ積雲が次から次へと形成され、東方へと移動していた。図6.35のRHI写真は、これらの雲をA、B、C、Dで識別して表示したものであるが、Aが最も古いものである。RHI写真には、もはや“A”は写っていない。不思議なことには、雲の風上側は形成後15から20分すると下降し始め、最後には大アリクイの形に変身していったのである。



<図6.35> CP-3レーダーが方位角96.2度の方向に走査して作った、3個の大アリクイ型雲のRHI断面図。雲“D”は最も新しく、高積雲の形をしている。雲“C”の頭部は、著者が17時57分30秒MDTにその下降気流域を横断したとき、下降し始めた。雲“D”は下の写真を撮影した18時07分に、地表面にマイクロバーストを発生させた。

図6.36は、ブライアン・スミス氏が CP-3 から東向きに撮影した雲Aから雲Dの写真である。最も新しい雲”D”は、高積雲の形をしている。雲”C”の頂点は、氷結している。雲”B”はアリクイの形をしている。そして雲”A”は、消滅期にある。

著者はキングエアー機に乗って、西に向かいながら赤の丸で示した雲”C”の頭部を横断したのである。航空機が雲に接近すると、急激に下降しているバーガの軸が現れた。航空機は、図中で暗く写っている下降中のバーガの直上を横断し、7.1メートル/秒(秒速23フィート)の下降気流の速度を測定した。



<図6.36> ブライアン・スミス氏が CP-3 から17時40分撮影した、4個の大アリクイ型雲の広角および望遠写真。横断中の写真は、キングエアー機より藤田によって撮影された。

大アリクイ型雲は、PPI 走査で発見することは困難である。この項での事例研究では、CP-3 は東部セクター（分割された扇型の地域）内の RHI 連続走査を行った。図 6.37 は、17 時 59 分 23 秒と 18 時 00 分 50 秒 MDT の同地域の PPI 走査写真を示している。これらの写真は、走査した雲が大アリクイの型をしている事実を示していない。だが、PPI 走査をしている数分間に、CP-3 によって行われた RHI 走査による断面図は、方位角 96.2 度の方位にアリクイの型をした雲を写し出しているのである。

図 6.37 中の高度角 1.0 度による画像は、東から西に移動しているガストフロントを示している。気流が低高度に限られているため、ガストフロントは高度角を上げていくにつれ、消えてしまっている。4.5 度の高度角では、走査面はアリクイ型雲 "B" の底面と交差している。雲底の低い部分は環状になっていて、アリクイの型にはなっていない。

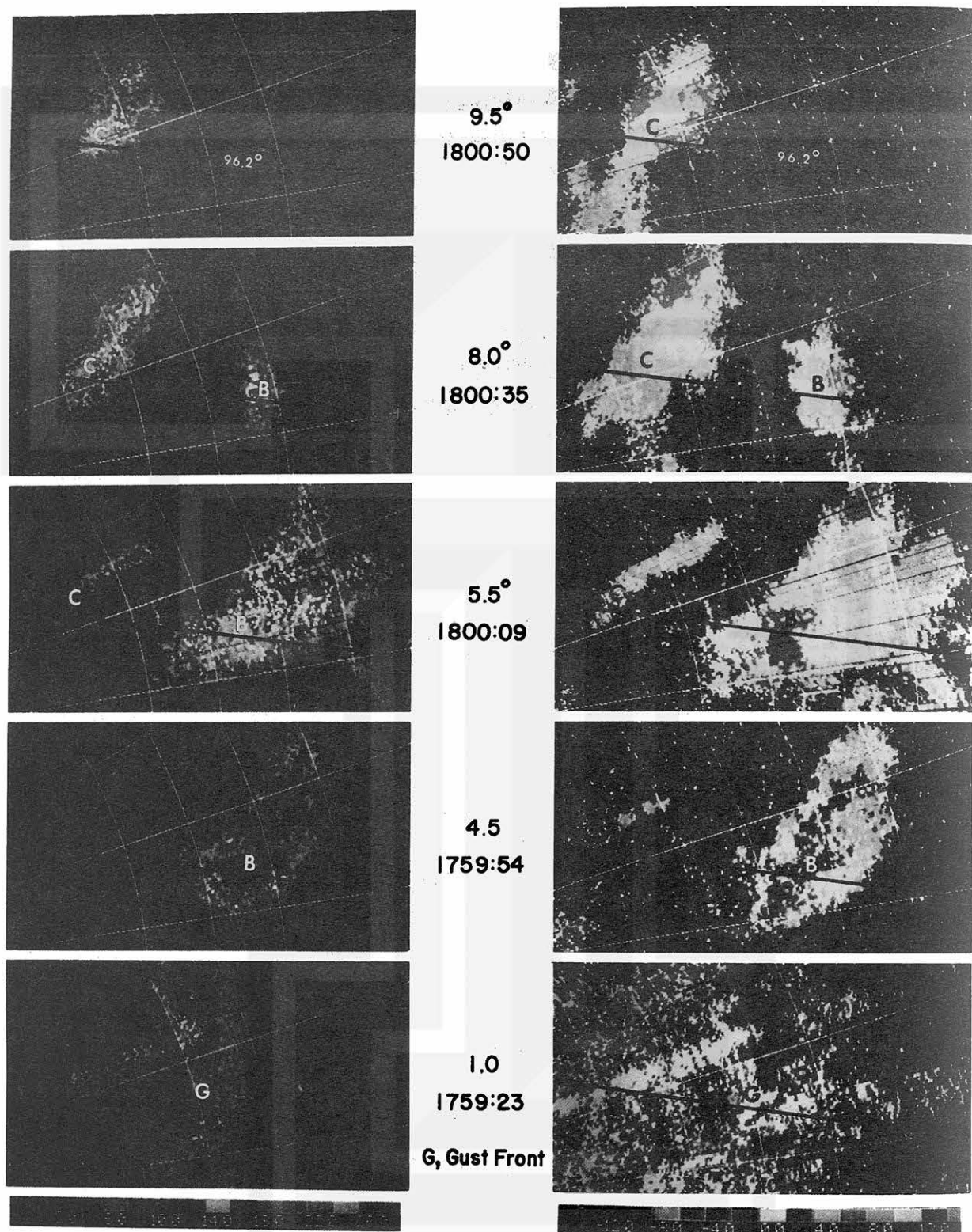
高度角を更に上げてゆくと、レーダーのビームはアリクイ型雲の中部および上部を輪切りにするように走査するが、RHI 走査で見られるような特徴ある型は現れては来ない。

図 6.38 は、CP-3 の RHI 走査によって探知したアリクイ型雲に、飛行経路を重ね合わせたものである。飛行計画には RHI 面内の飛行が予定されていたので、航空観測による水滴の分布と CP-3 による反射率の場は、実に良く合致した。図 6.38 の 2 つの水滴分布図に示したように、新しい雲 "C" は、古いものより多量の、しかもあらゆるサイズの水滴を包含していた。この事実は、雲 "B" に含まれていた大型の水滴の一部は、すでに地上に落下してしまったことを物語るものである。

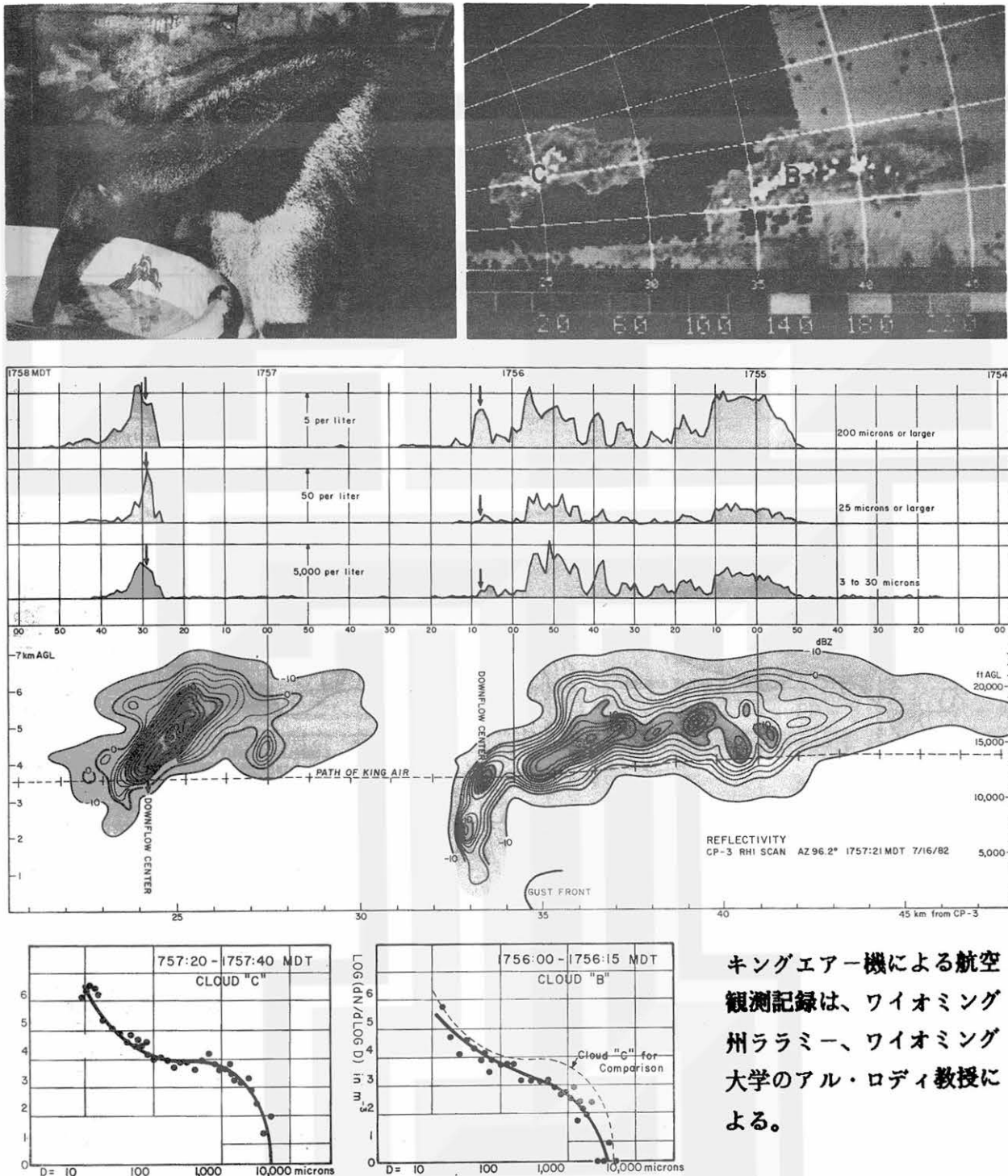
図 6.39 のドップラー速度の場に飛行経路を重ね合わせた図によると、キングエアー機は偶然にも両方の下降流をとりまくマイソサイクロン中のドップラー速度が弱くなっている部分を横断しているのである。この低速の風の深さはわずか 2.3 キロメートル (600 から 1000 フィート) で、マイソスケールの渦動は、比較的薄い低層の中で最も顕著になっていることを示している。

17時56分、西向きへの横断飛行完了後、アリクイ型雲”B”の頭部の横断が繰り返された——18時01分に西から東へ、18時5分に東から西へ、そして最後は、18時09分に西から東へ。18時05分0秒、最大速度13.9メートル/秒（秒速46フィート）の下降気流が測定された。18時07分、最後の接近を行っている際、アリクイの頭部があった場所の下の地表面で、弧を描くように砂が舞い上がった。航空機は18時08分46秒、晴天域で7.8メートル/秒（秒速26フィート）の下降気流を測定した。そしてこのアリクイの頭部が発生させた下降気流は、地表面上で長さ1.2マイル（2キロメートル）の砂嵐に変わっていた。

この事例研究は、最初高積雲として発生する、大アリクイ型雲の生涯を明らかにしている。すなわち、雲頂が氷結すると、風上側の雲が次第に降下を始め、大アリクイの型を形成する。そしてその後突然に頭部が地上に落下し、砂嵐が発生させるのである。

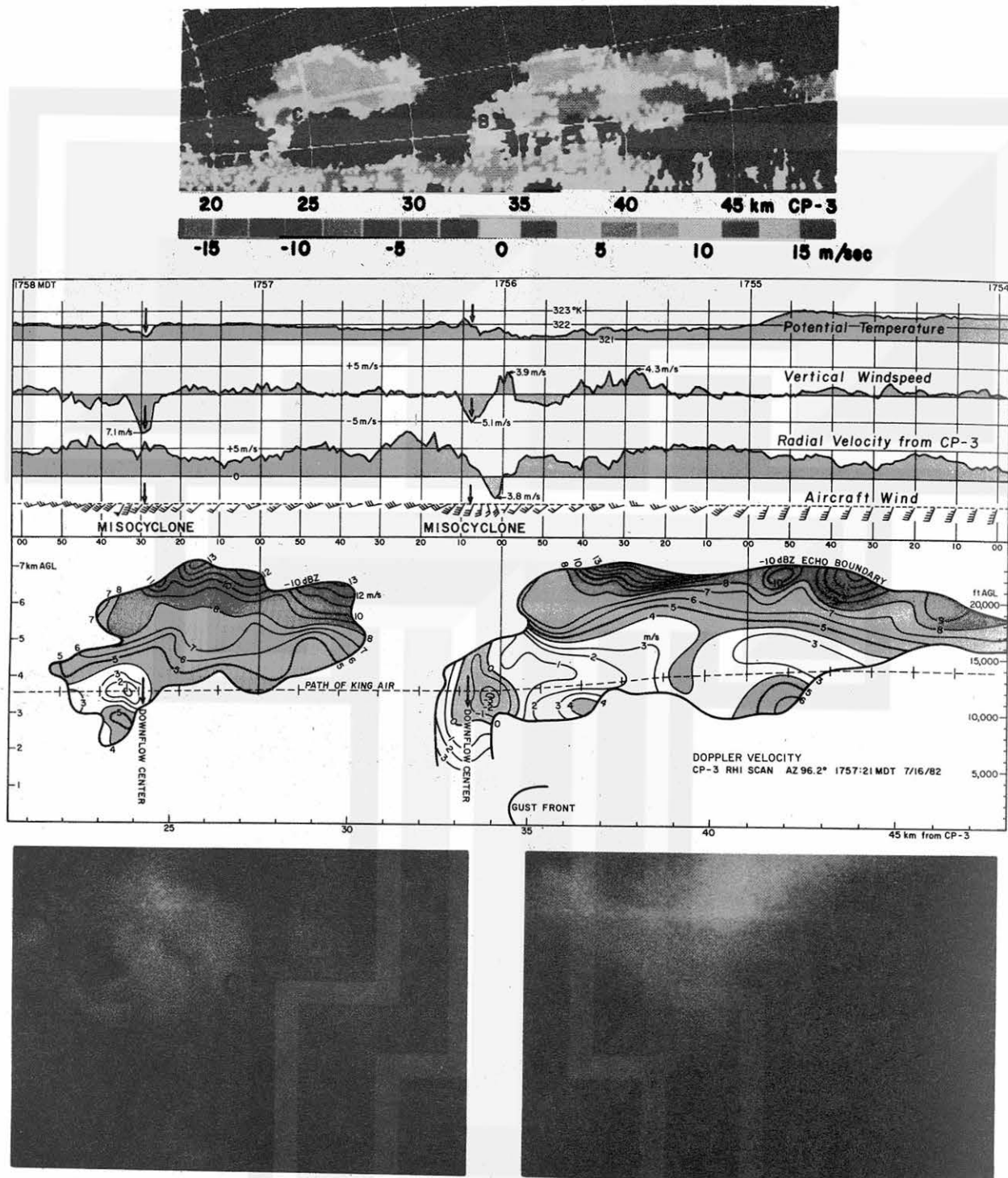


<図6.37> CP-4のPPI走査によって検知した、大アリクイ型雲の反射率(左)と速度(右)のPPI写真。



キングエア機による航空観測記録は、ワイオミング州ララミー、ワイオミング大学のアル・ロディ教授による。

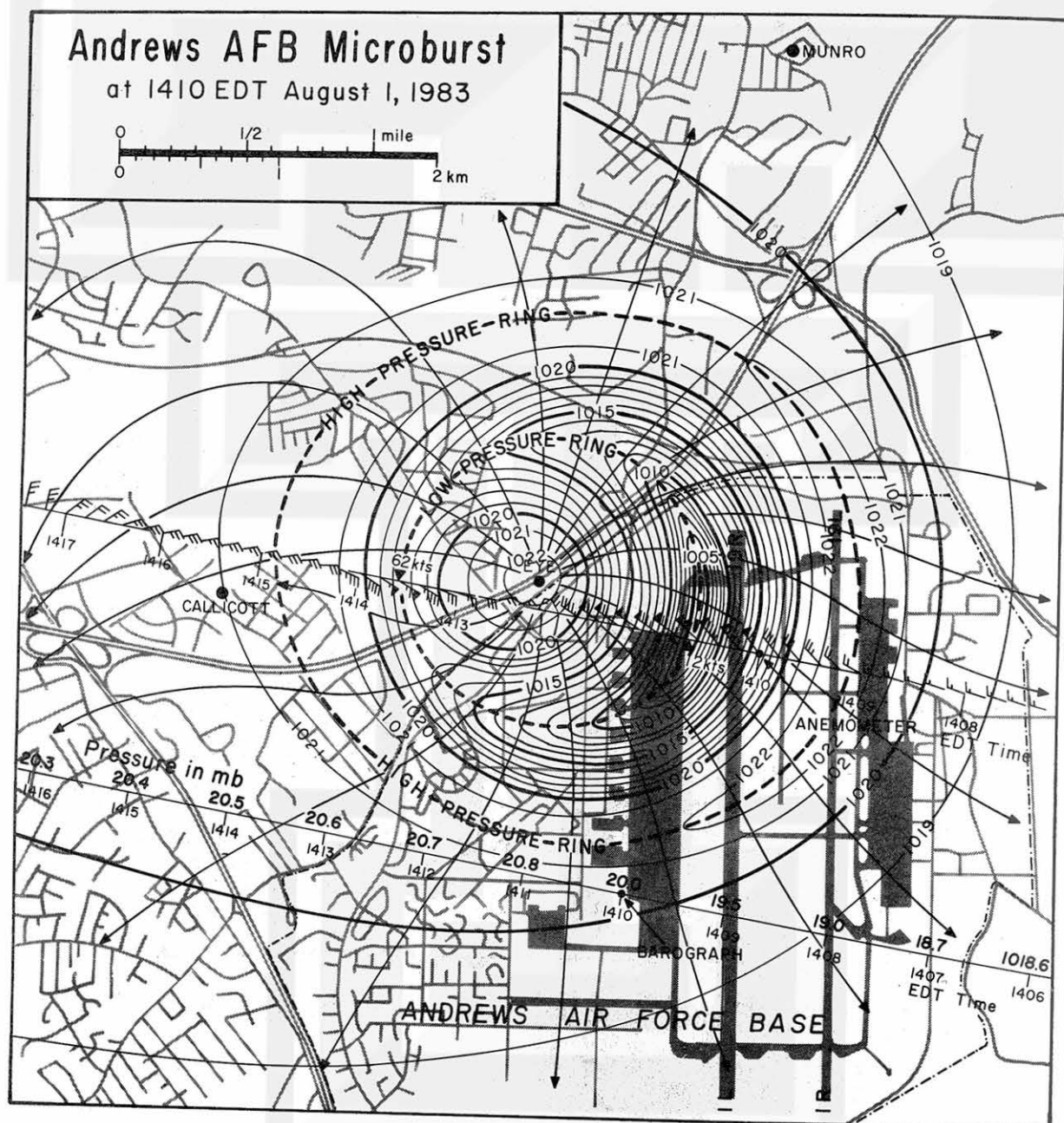
<図6.38> 著者がキングエア機で横断した大アリクイ型雲”A”および”B”。17時57分21秒 MDT、CP-3が走査した反射率の場に、飛行経路が重ね合わされている。最盛期の雲”C”の型は、大アリクイによく似ている。ブルックフィールド動物園にて藤田撮影。



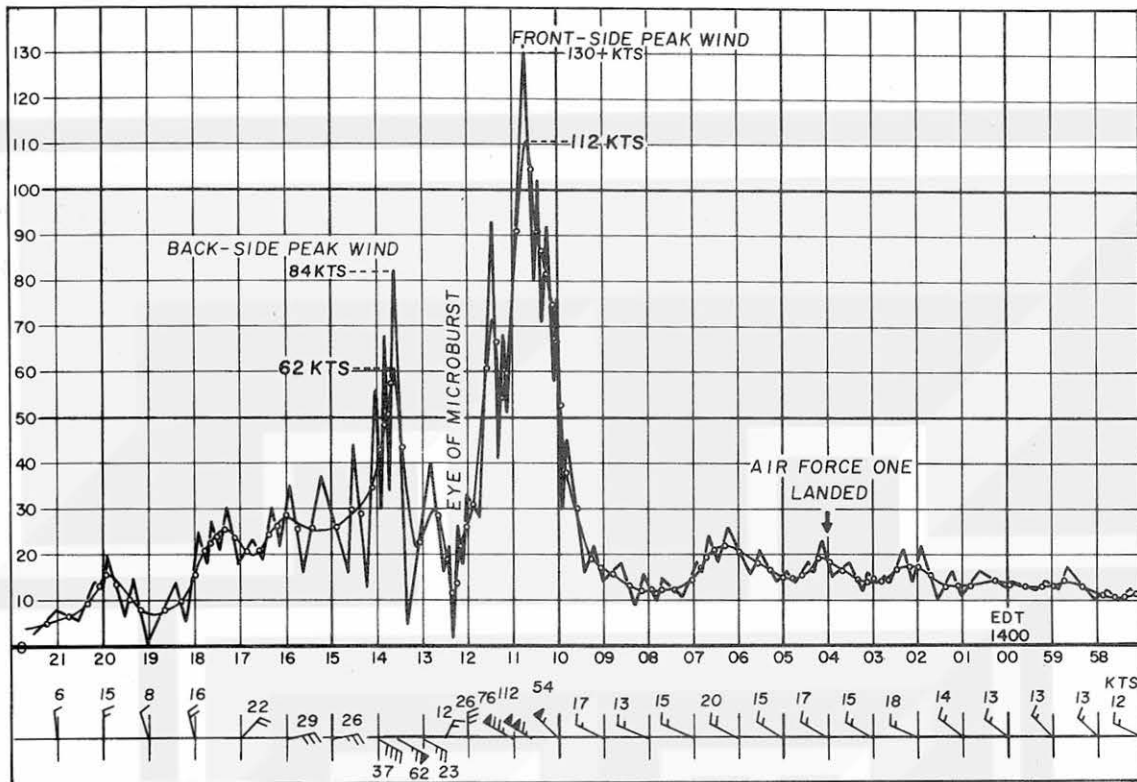
＜図6.39＞ CP-3方位角96.2度でのRHI走査によって検知された、雲”B”および”C”の速度の場。下の写真は、雲”C”および”B”の下降気流域。CP-3が測定したビーム方向の速度は、機が測定した風のCP-3方向の速度成分を表している。

6.10 アンドリュース空軍基地マイクロバースト — 1983年8月1日

1983年8月1日、アンドリュース空軍基地で測定された 130+ノット (時速 150マイル) の風は、空港で観測されたマイクロバーストの風としては最大のものであった。GMG-20型プロペラ風力計は地上16フィート(4.9メートル)の高さにあり、滑走路の北側に設置されていた。



<図6.41>風と自記気圧計の記録を、時間-空間換算法 (time-space conversions) によって作成したアンドリュース空軍基地マイクロバーストの気圧の場。



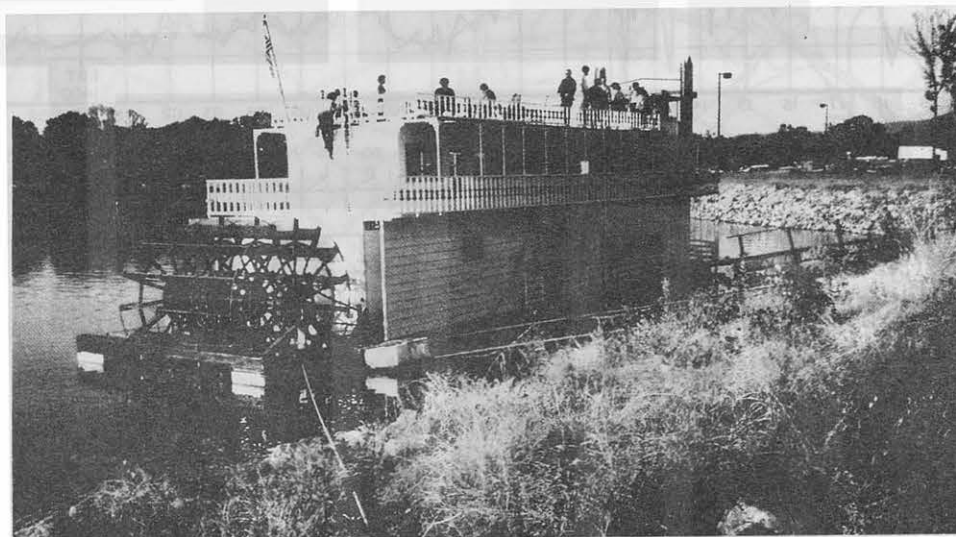
＜図6.42＞ マイクロバーストの前面での最大風速 130+ノット（平均 112ノット）、後面での最大風速84ノット（平均62ノット）を示す風の拡大図。マイクロバーストの中心に目がある。赤で記入した風は、相次ぐ弱風と強風の間の平均値。

新聞の報道によると、レーガン大統領を乗せたエアフォース・ワン（大統領専用機）は、14時04分 EDT に乾いた滑走路に着陸した。14時09分20秒、風が強くなり始め、14時10分45秒最大に達した。次に風速は急激に低下し、マイクロバーストの目が風力計の上を通過した時には2ノット（秒速1メートル）となった。14時13分40秒には、最初の風が北西から吹いていたのに対して、反対側の南東から次の風が吹き出した。（図6.42）

表6.1のマイクロバーストの発生頻度によれば、時速 150マイル(67メートル/秒)にも及ぶマイクロバーストを経験する確率は、非常に少ない。米国内全土でも、このようなマイクロバーストが発生する確率は年に4個である。しかし、発生確率は極度に低いとはいえ、世界中の数多くの飛行場に離着陸しているどの航空機にも、間一髪の事態に直面する可能性はある。

6. 11ハンツビル観光汽船マイクロバースト—— 1984年7月7日

1984年7月号の NOAA の "STORM DATA" 誌は、「強烈な雷雨からのダウンバーストが、90フィートの水車汽船を転覆させ、11人が死亡、2人が負傷した。事故が起きたのはハンツビルの南、テネシー州のディート船着き場付近で、18人が搭乗していた。犠牲者は、下部船室に閉じ込められ、明らかに溺死した模様である。船長は、ダウンバーストからの突風を船の側面に受けたとき、船首を風に向け、船着き場へ引き返そうとしていた、と報じられている。10時27分 CST、ハンツビルのレッドストーン兵器庫では、時速70マイルの突風を観測していた。川の南西部にあたるモーガン郡レーシー・スプリングズ付近では、木はなぎ倒され、移動式小屋が転倒して破壊された。」と報じている。

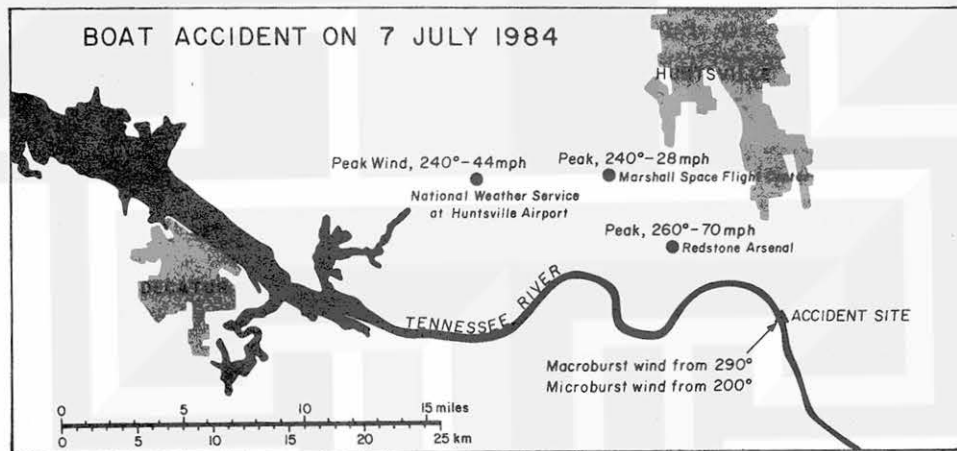


<図6.43> 1984年7月7日、11時25分テネシー川で転覆した船尾外車汽船。18人の搭乗者中、11人が死亡した。1984年7月発行の NOAA の "STORM DATA" 誌より。写真はゲイリー・マックラスキー氏撮影。

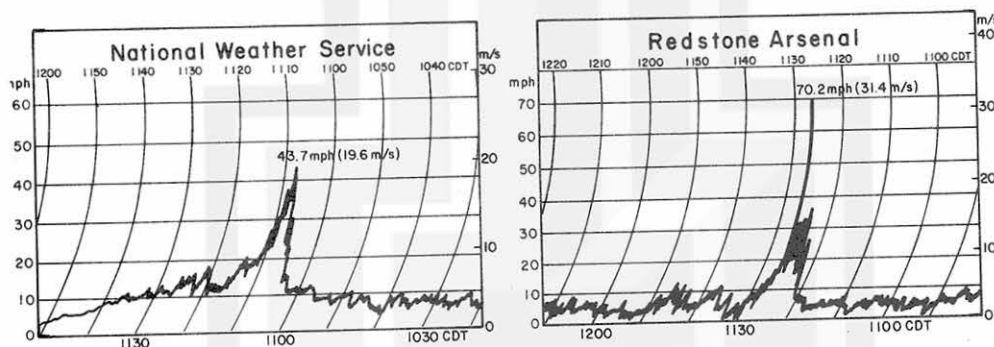
事故発生前に撮影された船尾外車汽船の写真が、図6.43である。この2階建の船は、長さ92フィート、幅20フィート、高さは25フィートである。それは当時、北西に向け航行していた。11時20分、推定30ノット (15メートル/秒) の西寄りの風の中で、雨が降り始めた。次の数分間風は段々強まり、290度の方位から推定60から70ノット (秒速31から36メートル) に達した。船長は方位を290度に向け、船首を風に正対させた。11時25分、突然に風向は90度近く変化した。強風は船尾外車汽船の左側面を襲い、船は転覆した。

事故の数分後、風は約20ノット（10メートル/秒）に弱まった。事故の5分後の11時30分には、風は事実上全く無くなり、無風状態となった。

事故現場から25キロメートル（16マイル）以内の地域には、3個の風力計があった。ハンツビル空港内の国立気象サービスでは時速44マイル（20メートル/秒）の最大瞬間風速を記録し、マーシャル宇宙飛行センターでは時速28マイル（13メートル/秒）を記録した。また、事故現場から9キロメートル北西のレッドストーン兵器庫では、最大瞬間風速時速70マイル（31メートル/秒）を記録した。



<図6.44> 事故現場付近の3個の風力計。これらのうち、国立気象サービスとマーシャル宇宙センターの風力計は、マクロバーストだけの影響を受けていた。これに対し、レッドストーン兵器庫および事故現場は、マクロバーストとマイクロバーストの両方の影響下にあった。



<図6.45>国立気象サービスで記録された、マクロバーストの風（左）。レッドストーン兵器庫の記録は、マクロバーストの風の記録の上に、スパイク状に立ち上っているマイクロバーストの風を同時に示している。

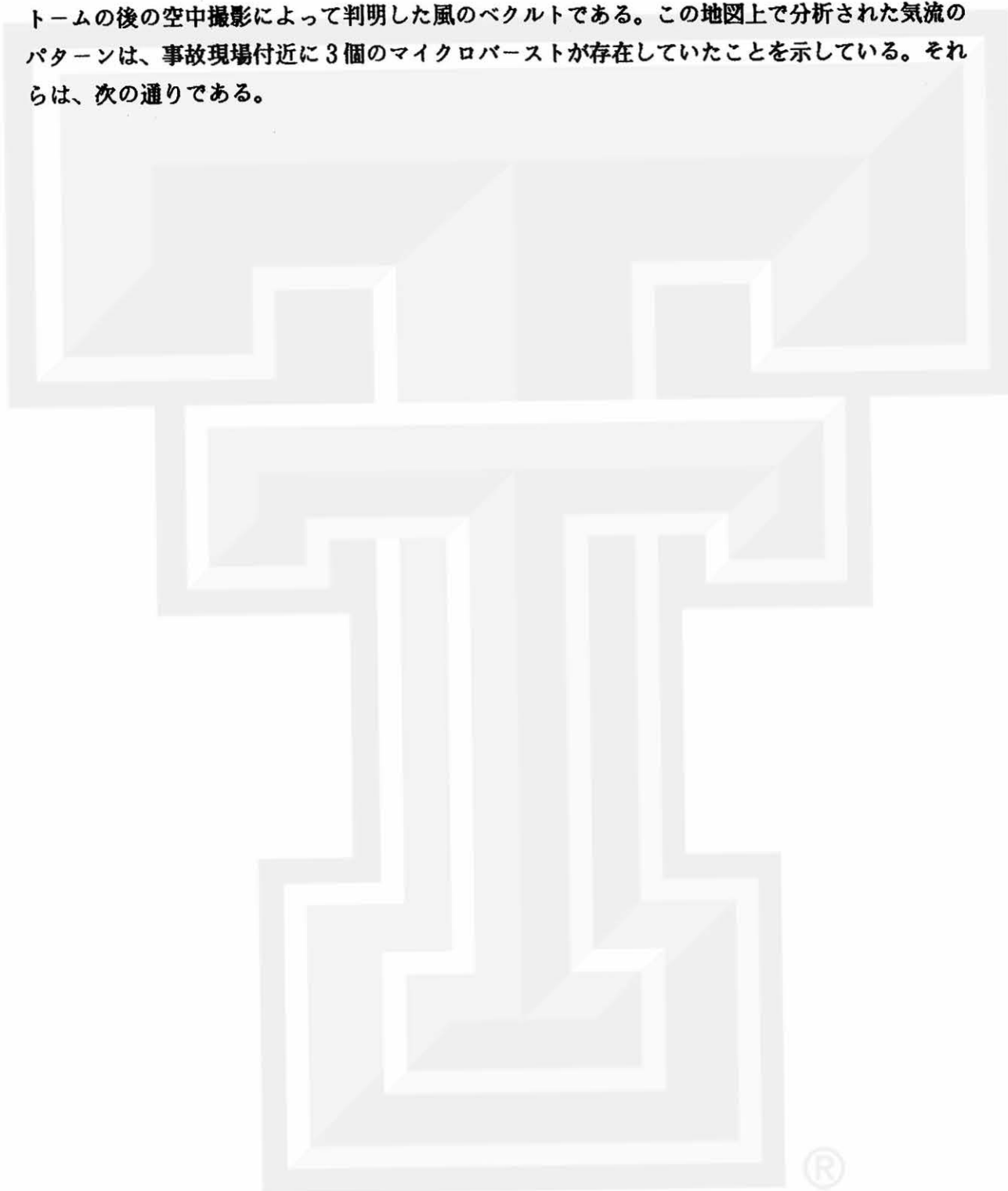
国立気象サービスの風力計の記録は、11時05分から11時08分 CDT の3分間に、風速の急上昇を示している。最大値を記録した後の風速の減少は、指数関数的で、これは最大瞬間風速が、マイクロバーストではなく、マクロバーストの後面で発生したことを意味している。レッドストーン兵器庫の風力計は、マクロバーストのガスト・フロントと、マイクロバーストの両方の影響を受けた。マクロバーストの風は、11時21分 CDT に始まり、3分間で時速36マイル (16メートル/秒) に達した。その後10分間に、風は指数関数的にほとんどゼロになった。マイクロバーストの風をマクロバーストの風の上に重ねて見ると、それ (マイクロバースト) はわずか1分も続かなかった現象であることがわかる。(図6.45)

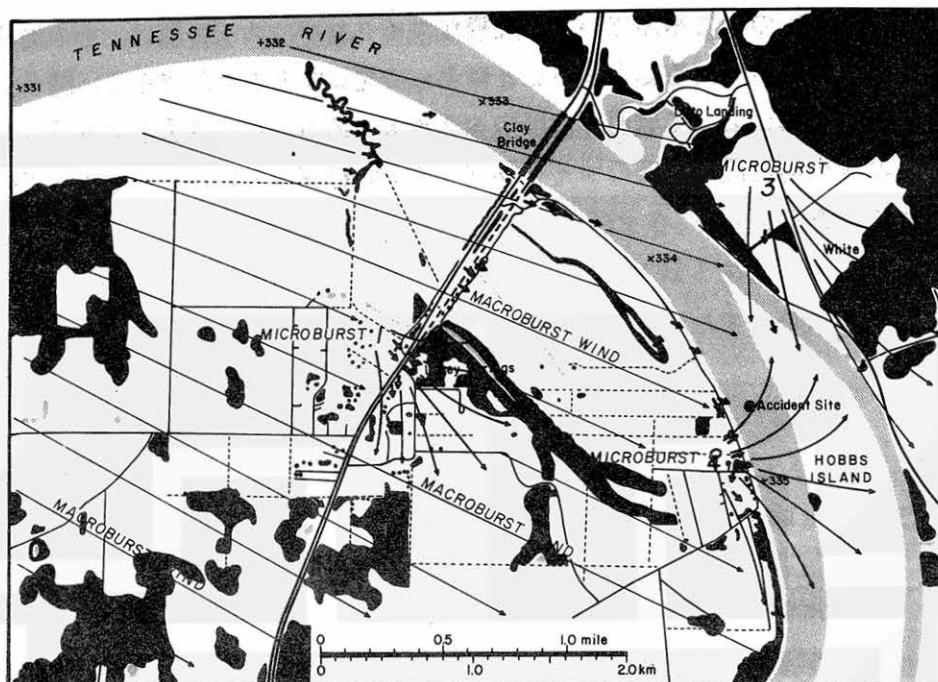
表6.3に示した兵器庫での気象観測の詳細は、雷雨が観測地点の直上を通過して行った際に、マイクロバーストが発生したことを物語っている。11時27分の電光は連続的で、雲の中、雲と雲の間、雲と地上の間で起こっていた。豪雨の中での地上の視程 (見通し) は 1/8マイル (200メートル) で、低層の雲の雲底は地上1000フィート (300メートル) であった。それは米国の湿潤した地域に発生が予想される、強力なウェット・マイクロバーストであった。

<表6.3> 1984年7月7日のマイクロバーストの活動前、活動中、活動後のレッドストーン兵器庫における気象観測。略号は、Sはscatter (雲量が全天の0.1 - 0.5)、Bはbroken (雲量が全天の0.6 - 0.9)、Oはovercast (雲量が全天の0.9以上)、Visibは地上視程、Tは雷鳴、RWはしゅう雨、Pressは海面気圧、Tdは露点温度、Dirは風向、Max、Mean、Minは観測時の1分以内の、最大、平均、最小風速 (単位はマイル/時)、MVGは移動中、DSTは観測地点からの遠方、OCNLは時々、LTGは雷光、OVHDは観測地点の直上、CONTは連続性の、FQTは断続性の、N、NE、E、SE、S ----は東(E) 西(W) 南(S) 北(N) の8分割方位を表す。

Time (CDT)	Sky and Ceiling	Visib (miles)	Weather	Press (mb)	T/Td (°F)	Dir (deg)	Max	Mean	Min	Remarks
0855	3500'S 10000'S 25000'B	7		1016.8	80/72	230		05		
0956	3500'S 10000'S 25000'B	7		1016.5	82/72	300		03		
1035	3500'S 10000'S 25000'B	7	T	1016.1	84/71	250		05		T SW-N MVG NE DST LTG
1058	3500'S 10000'B 25000'O	7	T	1015.7	86/74	190	06	05	01	T W-N MVG NE OCNL LTG
1120			T RW-	1016.5	84/70	240	07	06	06	
1121			T RW-	1016.4	84/70	250	11	10	06	
1122			T RW-	1016.4	84/70	250	26	18	11	
1123	1500'B 3000'O	2.50	T RW	1016.3	83/60	260	25	20	15	T OVHD MVG E CONT LTG
1124			T RW	1016.3	82/69	260	36	26	17	
1125	1500'Overcast	0.75	T RW+	1016.2	68/67	270	33	25	19	T OVHD MVG E CONT LTG
1126			T RW+	1016.2	67/66	260	69	34	16	
1127	1000'Overcast	0.12	T+RW+	1016.2	67/66	260	70	26	14	T OVHD MVG E CONT LTG
1128	1000'Overcast	0.75	T+RW+	1016.1	67/66	210	14	11	05	T OVHD MVG E CONT LTG
1129			T RW	1016.1	67/66	220	11	08	04	
1131	1000'B 3000'O	3	T RW-	1016.0	67/66	270	05	03	00	T N-E-SE MVG E FQT LTG
1157	1000'B 3000'O	5	T RW-	1016.8	68/67	110	06	05	03	T NW, NE-E-SE MVG E
1215	1500'B 3000'O 10000'O	7	T	1016.6	68/67	160	07	06	05	T N, E MVG E OCNL LTG

マクロバースト全体の中に潜んでいる小規模なマイクロバーストの風は、その地域の地図上に被害をもたらした風の風向を記入することによって発見することができる。図6.46は、ストームの後の空中撮影によって判明した風のベクトルである。この地図上で分析された気流のパターンは、事故現場付近に3個のマイクロバーストが存在していたことを示している。それらは、次の通りである。



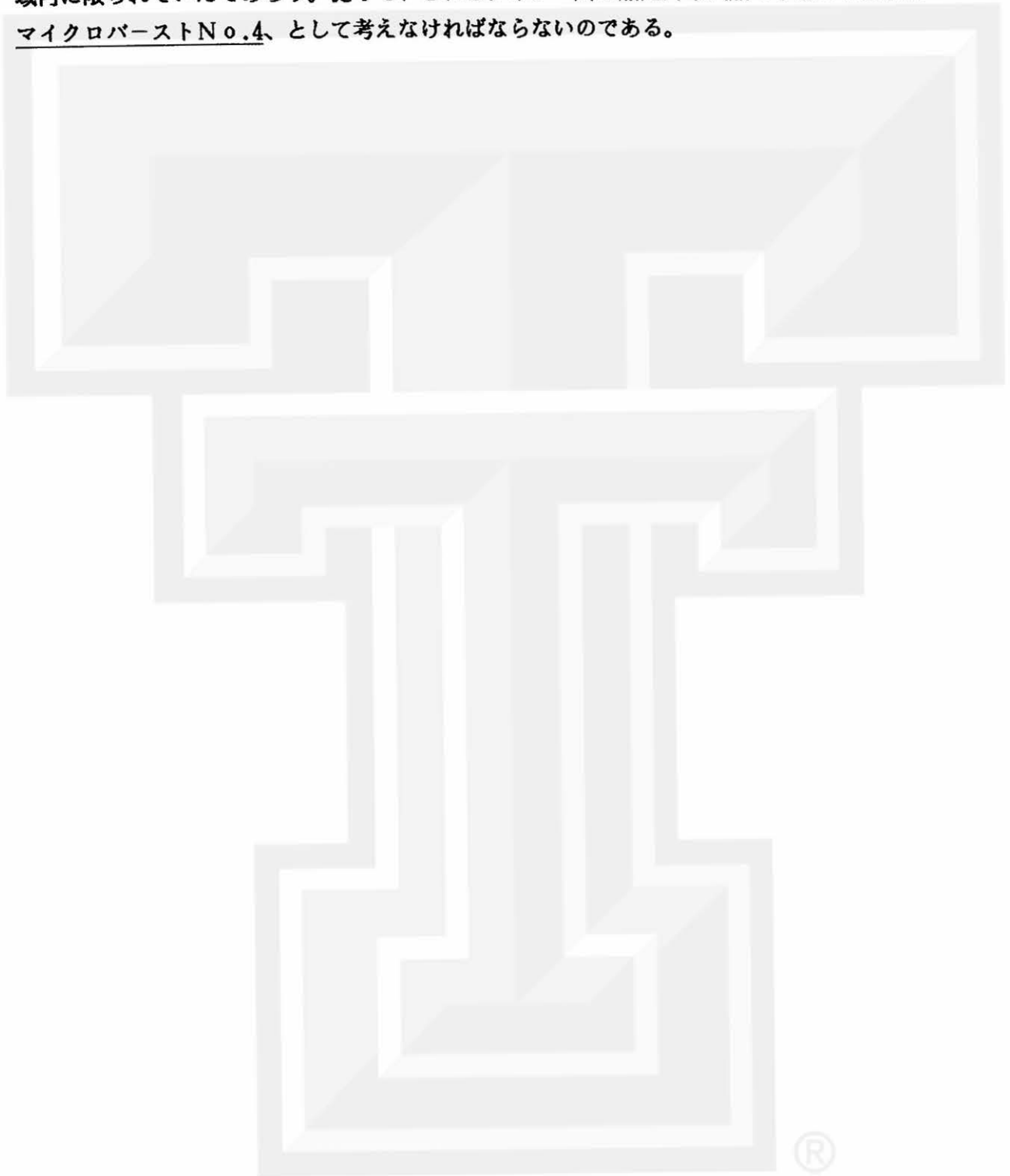


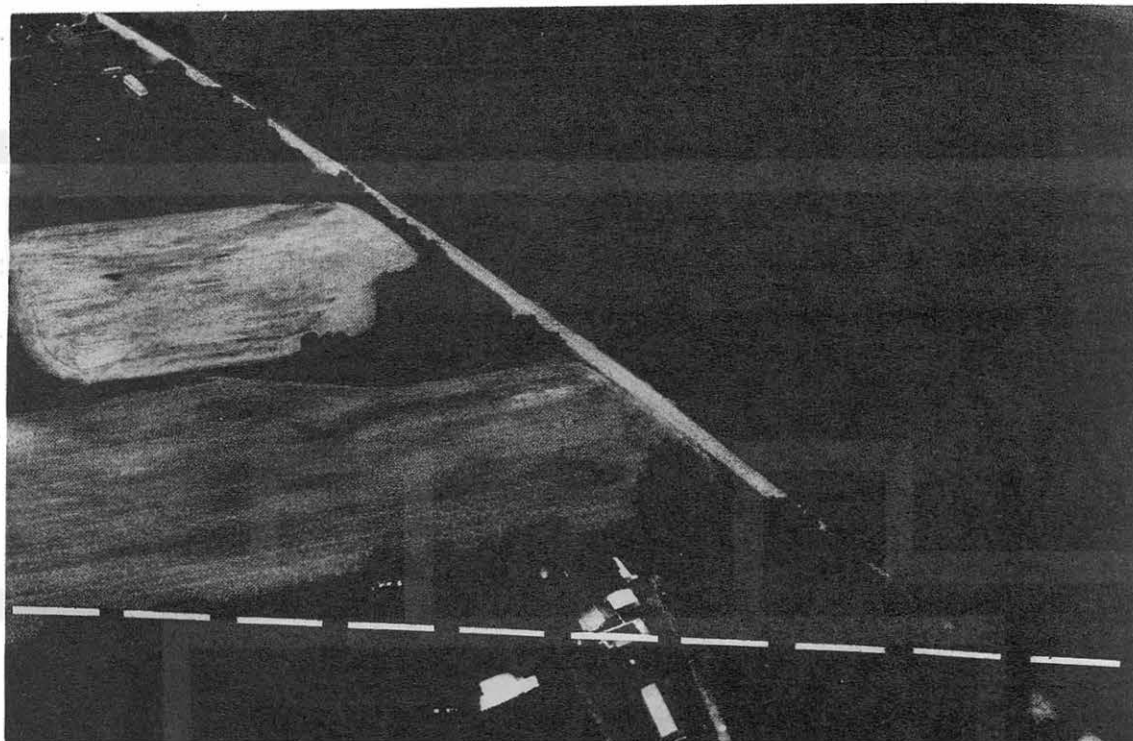
＜図6.46＞ 事故現場付近の3個のマイクロバーストと1個のマクロバーストの気流のパターン。この地図はストーム後の空中写真を基に作成された。

- マイクロバーストNo.1 レイシー・スプリングズに発生した。木がなぎ倒され、移動式小屋が転倒した。
- マイクロバーストNo.2 事故現場の南部に発生した。マイクロバーストの中心の直下にあった森の樹木は押し倒され、枝は折られていた。
- マイクロバーストNo.3 ホワイト・スプリングに発生した。空中調査と引き続いて行われた被害のベクトル解析の図表化によって、発散性のパターンが発見された。

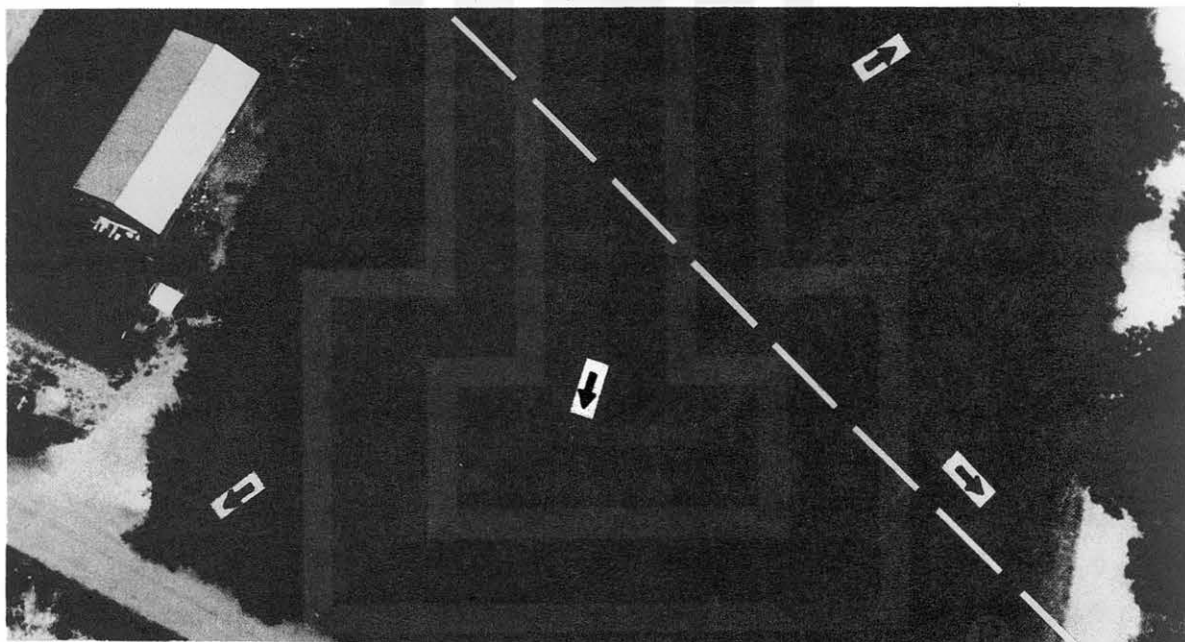
これらのマイクロバーストの外側で吹いていた風は、直線状の風で、地図の全体の場合は290度の方向から吹いているマクロバーストの風の影響下にあったことを示唆している。もしこれらのマイクロバーストの1つの中に風力計があったならば、それはレッドストーン兵器庫タイプの風を記録していたことであろう。他方、マイクロバーストの外側ではどうかと言うと、鋭いカーブで上昇し、指数関数的に風速を減少させるという特徴をもつ、あの国立気象サービスタイプの風を記録したであろう。

マイクロバーストの気流は小規模（マイソスケール）であるため、そこからの吹き出しは、広い地域には広がらない。レッドストーン兵器庫のマイクロバーストの活動も、多分兵器庫地域内に限られていたであろう。従って、これはテネシー川の船尾外車汽船の事故とは無関係のマイクロバーストNo.4、として考えなければならないのである。





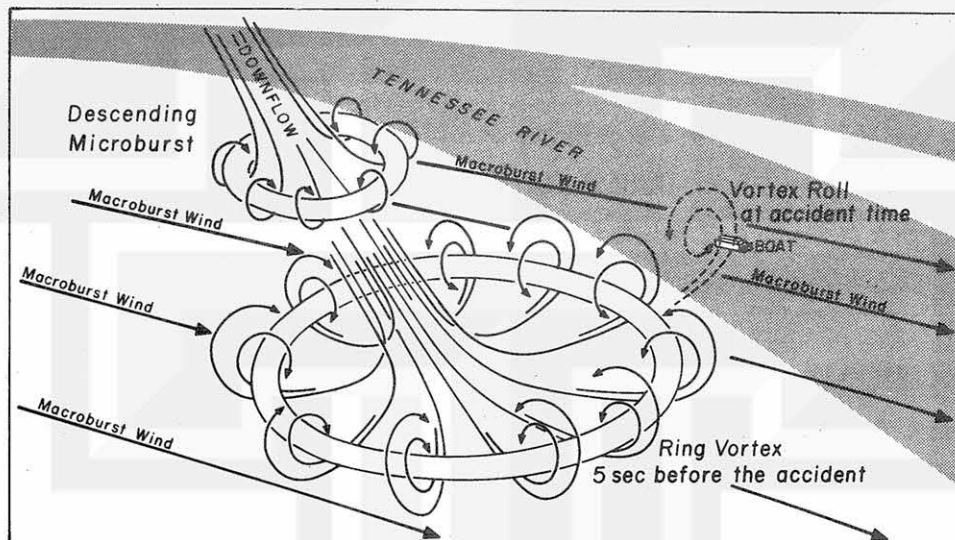
<図6.47> 事故の後、北北東に向いて撮影した、事故現場の空中写真。マイクロバーストの進行経路は、赤と白の破線で示している。事故船の位置は、赤のバーで示している。藤田撮影。



<図6.48> 北北西に向いて撮影した、森の望遠写真。黒の矢印によって目視できるように森林の樹木は下向きに押され、スターバーストの強風によって損傷を受けている。藤田撮影。

船尾外車汽船とマイクロバーストの中心が通過した経路との関係は、図6.47に示した。このマイクロバーストは、ユージン・マロン氏宅と川の間にある、森の直上を通過した。森を拡大した空中写真は、木を引き抜き、枝を放射状にへし折った、スターバーストの爪跡を見せている。

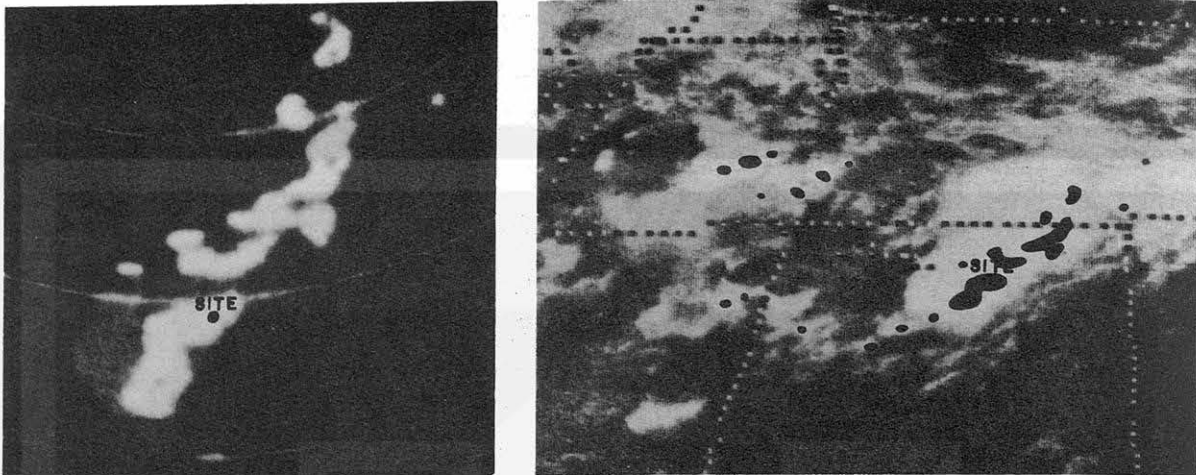
概念図に示した当該マイクロバーストは、下降気流が環状の渦をつくり始めたときの降下過程を示している。このマイクロバーストは、事故の発生した約5秒前に着地した。その後、渦のロールは拡張してゆき、船尾外車汽船に南南西の方向から到達したのである。



<図6.49> マイクロバーストNo.2の下降気流を取り囲む、渦の環の概念図。この渦は、着地後急速に拡張してゆくと予想されている。渦のロールが船の直上を通過した際、水車汽船は南南西の風に直撃された。

数年前、NOAAの環境研究所のフエルナンド・カラシナ氏は、マイクロバーストの下降気流域を取り囲む渦の環の概念を、始めて提示した。それ以来、渦の環の存在は、あらゆる場面で確認されてきた。図1.5、2.7、2.9、2.12、3.21参照。

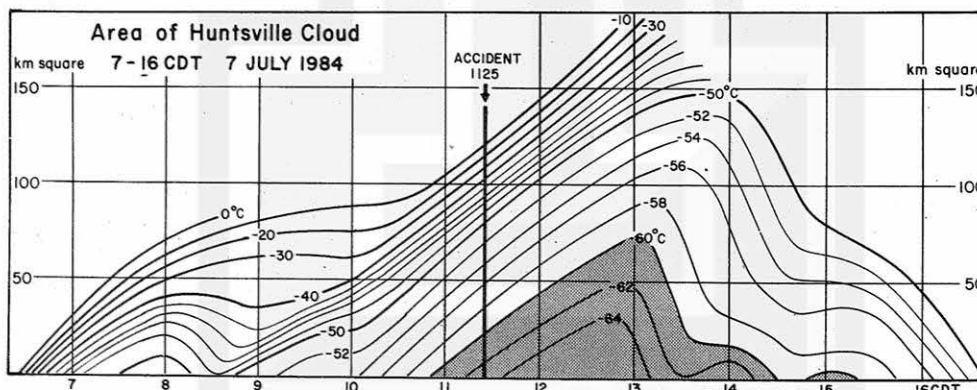
ハンツビル地域に1個のマイクロバーストと、それ以外に4個以上のマイクロバーストを発生させたレーダー・エコーは、比較的小さいものであった。それはハンツビル地域を11時09分から11時35分 CDT にかけて通過していった、一連の線状のエコー群のうちの1つであったのである。



<図 6.50> 11時35分 CDT、テネシー州ナッシュビルにある国立気象サービスがレーダーで撮影した線状のエコー（左）と11時35分 CDT 走査の GOES EAST 気象衛星写真にナッシュビルとアラバマ州セータービルで写したレーダー・エコーを重ね合わせた図。（左）エリック・ピーターソン氏と共同解析。

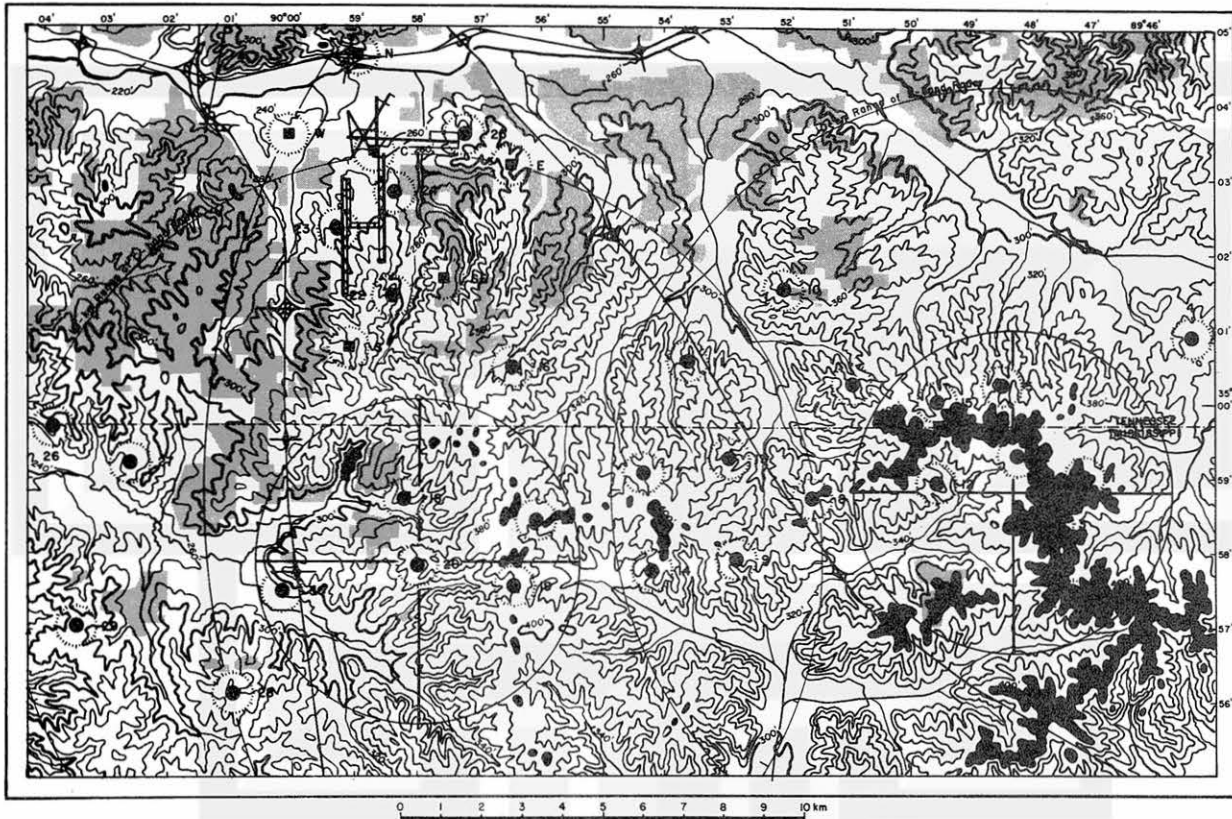
ハンツビル観光汽船マイクロバーストを発生させた親雲のレーダー・エコーは、事故直前に最大強度に達した。事故の10分後に撮影した衛星写真は、エコー全体を覆う広範囲のかなとこ雲を写し出している。雲頂の最低温度は、 -63°C であった。（図 6.50）

特定の等温線に囲まれた部分と定義された雲の面積を雲頂温度の関数として計算した。結果は図 6.51に見るように、最初の雲は、7時00分以前に形成され始めたことを証明している。その後8時30分に急成長が始まり、12時30分から14時00分の間に最大強度に達している。事故は11時25分、雲頂温度が最低になる約1時間前に発生したのである。

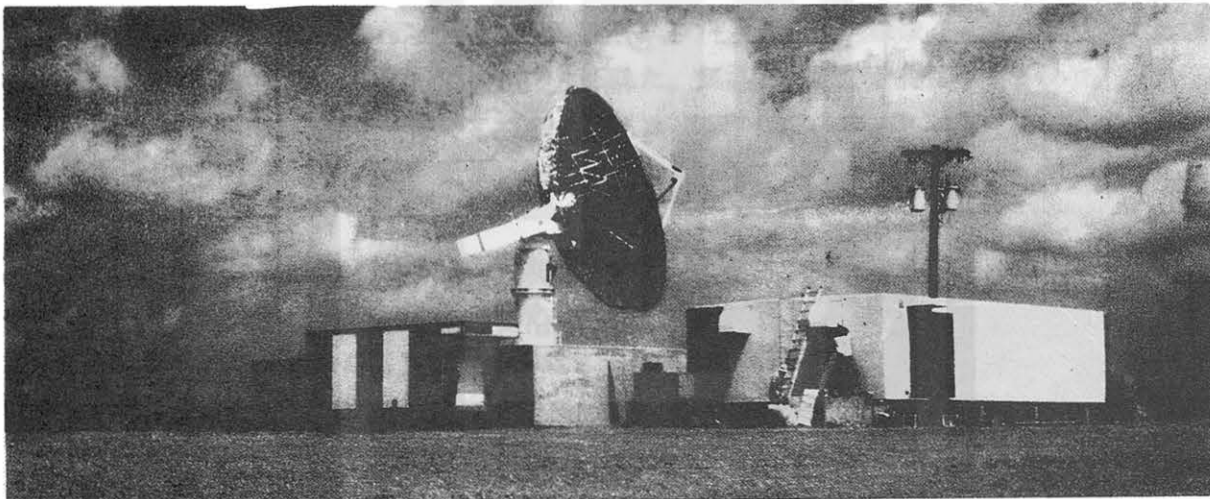


<図 6.51> 0°C から -64°C の雲頂温度の関数として計算した、ハンツビル地域に発生した雷雲の面積。計算および解析はエリック・ピーターソン氏。

6.12 メンフィス空港マイクロバースト — 1984年10月20日



<図6.52> 連邦航空局とリンカーン研究所が1984年テネシー州メンフィスに設立したメソ気象観測網。S-バンド・ドップラー・レーダーが、ミシシッピー川オリブ・ブランチ空港の西の平原に設置されている。



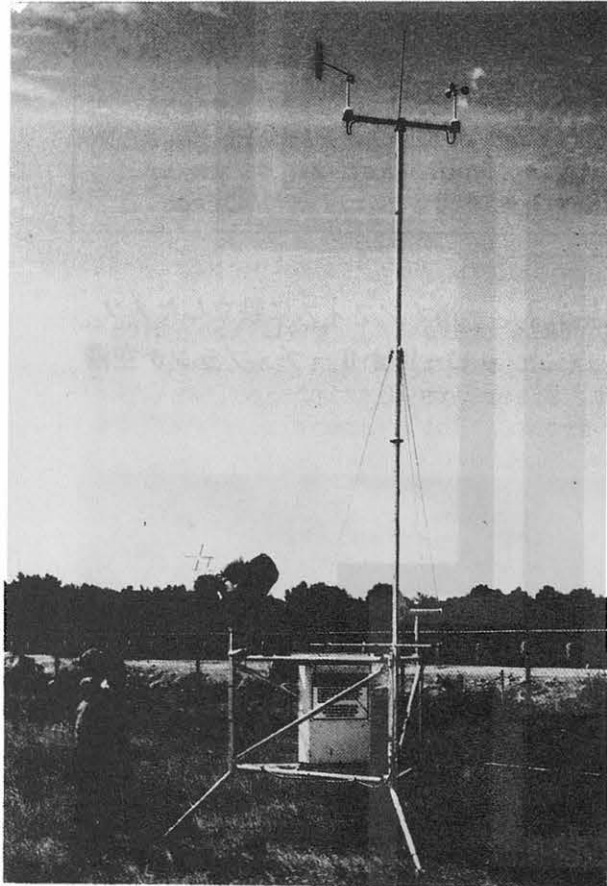
<図6.53> レーダー用ドームを外したリンカーン研究所のS-バンド・レーダー。マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所撮影。

低高度におけるウインド・シアアをドップラー・レーダーを使用して検知する実用化試験のため、マサチューセッツ工科大学(MIT) のリンカーン研究所は、連邦航空局の支援を受けてテネシー州メンフィス空港内およびその南部のセクターに、メソ気象観測網 (mesonet) を1984年に設立した。この観測網は、S-バンド、C-バンドのレーダー、30カ所の観測塔によつて構成されている。(図6.52、6.53、6.54)

それに加え、空港内外の6カ所の風力計から成る LLWSAS (Low Level Windshear Alert System—低高度ウインドシアア警報装置) によって測定された風は、MITリンカーン研究所によって記録され、保存されている。

この事例研究で述べられているのは、1984年10月20日18時06分 CST に最大瞬間風速30.2メートル/秒 (時速68マイル) をもたらした、マイクロバーストの特徴である。マイクロバーストの

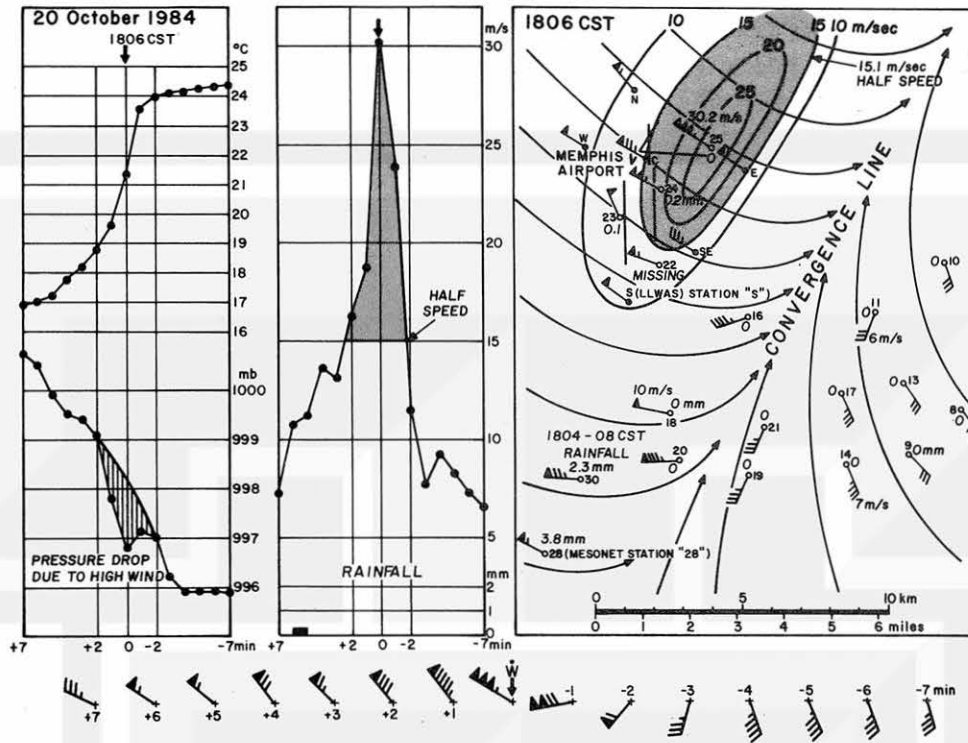
活動開始前の周囲の風は、南から7ないし9メートル/秒 (時速16から20マイル) であった。風は2分間で最大に達し、次の2分で15メートル/秒 (時速34マイル) 以下に減少した。最大風速の2分の1の速度 (半速風) の持続時間によって決められるマイクロバーストの寿命は、この場合4分間であった。(図6.55)



<図6.54> 建設中の改良型観測塔の光景。

この図のような観測所が30カ所メンフィス・メソ気象観測網に設置され、MITリンカーン研究所によって運用されている。各観測塔の平均間隔は1.5から3.0キロメートル (1から2マイル) である。

メソ観測塔は、風向、平均風速、最大瞬間風速、気温、気圧、分単位の降雨量を測定する機能を持っている。測定された数値はGOES衛星を経由して集計所に電送され、保管される。マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所撮影。



<図 6.55> 1984年10月20日、メンフィス空港に発生した回転円筒型マイクロバースト。このマイクロバーストは、時速45キロメートルで南東に移動していたガストフロントの後面、空港の直上で形成された。データー収集および解析は、マサチューセッツ工学大学リンカーン研究所のマリリン・ウルフソン女史による。

メソ観測網からのデーターを詳細に解析したところ、このマイクロバーストはメンフィス地域を通過して行ったガストフロントの後面に位置していたことが判明した。その結果、マイクロバーストの影響下にあった地域の空気は、マイクロバーストの消滅後、ガストフロントを後面から押し出していた寒気によって置き換えられた。気温と気圧の変化は、マイクロバーストの活動中の急激な気圧の低下を除いて、ガストフロント特有のものであった。〔気温は低下し、気圧は上昇した。〕マイクロバーストによる気圧については、図 4.23を参照。

下降気流を伴ったマイクロバーストと異なり、このマイクロバーストの特徴は、バースト・スワース状の被害をもたらす、平行線に沿って吹く強風帯を有することであった。JAWS における1982年6月30日のマイクロバーストで触れたように、このマイクロバーストもまたメンフィス空港の南西から北東へ走る水平軸を中心に、回転する渦を伴った回転円筒型マイクロバーストであった。

この回転円筒型マイクロバーストは、非常に強い低高度におけるウインド・シアーを伴っていた。もしも航空機がこのストームを南東から北西に横断したならば、機は主要空港の通常の滑走路の長さである3キロメートル(10,000フィート)の距離内で20メートル/秒(39ノット)の向かい風の増加と、引き続いて15メートル/秒(29ノット)の向かい風の減少に遭遇していたことであろう。



総括と結語

いわゆる総観気象学といわれるものは、1920年代から1930年代にかけて、ノルウェー学派によって開拓され、低気圧に伴う前線の発見につながった。かくして確立された前線のモデルは、日常の天気予報の精度を飛躍的に高めた。

1950年代に入ると、特定の州、都市などを対象とする短期予報の需要が、米国の様々な地域で表面化した。このため、総観気象じょう乱の雑音とみなされていたメソスケールのじょう乱を完全に理解して、そのモデルをつくる必要性が発生した。1980年代に入った今日は、メソスケールの予報精度の大幅な向上を目指す、メソ気象学の時代として注目されている。もしすべてが順調に推移すれば、いかなるタイプのストームであれ、それをもたらす親雲発生時刻および発生位置を数時間も前に予報することができるようになる。

とは言うものの、不確実性の原理がある以上、われわれは親雲が予報されたからといって、そこから発生するストームの正確な位置と時間を誤差なく言い当てることのできる訳ではない。われわれにできる最善策は、“間違いようがない”の探知手段を開発することである。マイソ気象学の基礎的な知識はこの面で、マイソスケールのストームの探知と警報を顕著に改善することになる。著者は、1990年代がマイソ気象学研究の時代となるであろうと予想するものである。

総括の表：気象学研究の3分野と将来予想される進歩。ドップラー・レーダーは、マイソ気象学研究のデータを収集する上で、重要な役割を果たすことになる。

分野	研究対象規模	研究対象	改善対象
総観気象学	400 - 40,000km	高気圧および低気圧	日常予報
メソ気象学	4km - 400km	親雲	地域予報
マイソ気象学	40m - 4km	嵐	暴風雨警報

数年前まで、マイクロバーストとたつまきは、互いに無関係なものと考えられていた。この本では、強烈なストームとしての両者の酷似性について紹介した。たつまきは、渦巻状の気流が上方に突進する強度なマイソサイクロンであり、マイクロバーストは、気流が流入し下降する段階においては、渦巻状の気流が下方に突進する、マイソサイクロンに囲まれている。マイクロバーストは、逆さになった、あるいは反転した、たつまきと見ることができよう。

訳者あとがき

かねてから尊敬し、お目にかかりたいと思っていた藤田先生にお会いできたのは1984年9月4日、(社)日本航空機操縦士協会主催の講演会のため先生が来日されたときであった。

その翌月の10月16日、日本航空の社用で渡米した折り、シカゴ大学に先生をお訪ねした。このとき先生は、世界の航空界および気象学界から注目されていた研究の数々を集大成し、出版する作業を進めておられた。それが本書である。私がこの和訳を引き受けることになった経緯は、多忙な毎日を送っておられる先生の事情と、10億円以上の資金と数百人に及ぶマンパワーを投入して実施したNIMRODとJAWS計画の成果を、日本に伝えたいという先生の情熱に応えるためであった。内容が学生から一般の方にも理解ができるように、翻訳は可能な限り平易にし、解説を加えながら行ったつもりである。とは言え、浅学の私には、先生の堪能な英文を完全に訳し得なかった悔恨が残っている。

ここで先生について少しご紹介すると、先生は1953年にシカゴ大学から研究員として招聘され、研究を続けておられるうちに、異色の才能と卓越した業績を認められて、ついにアメリカの市民権を与えられ、同大学に残ることになった経歴の人である。

「たつまき」の研究者として、早くからアメリカ社会で知名度が高かった先生が、全世界の航空界にその名を知られるようになったのは、イースタン航空66便のケネディ空港事故(1975年6月24日)の解析以後である。先生が航空事故調査を手がけるキッカケとなったのは、1974年4月、米国中東部で発生した「4月大たつまき」の爪跡の中に発見した、ダウンバーストであった。

ダウンバーストの発見によって、それ以降、どれだけ多く航空機が事故を未然に回避し、それらの乗客と乗員が救われただろうか。藤田先生という、ひとりの非凡な科学者に対し、私たちはパイロットとして、限りない感謝の気持ちをいただいている。

米国で限定出版された本書は、本来、日本では入手が困難なものであるが、先生のお骨折りによって、米国科学財団およびシカゴ大学の同意が得られ、また、日本航空のご協力をいただいて、日本での発行ができたことは誠によろこばしい。和文の出版にあたり、日本航空運航安全推進部および航空機関士の進藤武彦、西郡直樹両君からのご協力をいただいたことを、最後に記しておきたい。

1985年5月25日

社団法人 日本航空機操縦士協会

理事 上田恒夫

THE Down Burst

下 降 噴 流

¥ 6,500

発 行 昭和 6 0 年 5 月 2 5 日 初 版 発 行

著 者 藤 田 哲 也

訳 者 上 田 恒 夫

発行者 園 山 鋭 一

印刷所 株式会社 三 州 社

発 行 所 社団法人 日 本 航 空 機 操 縦 士 協 会

郵便番号 105 東京都港区新橋 1 - 1 8 - 2

航空会館分館 電話 03-501-0433~5

振 替 東京 5-87896

協 和 銀 行 新 橋 支 店 (当) 413793

複 製 を 禁 ず